

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局(43) 国際公開日
2002年5月23日 (23.05.2002)

PCT

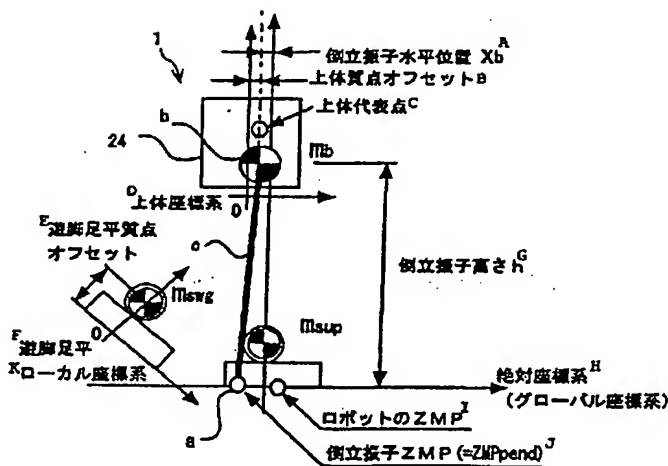
(10) 国際公開番号
WO 02/40224 A1

- (51) 国際特許分類: B25J 5/00 KABUSHIKI KAISHA) [JP/JP]; 〒107-8556東京都港区南青山二丁目1番1号 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP01/10026
- (22) 国際出願日: 2001年11月16日 (16.11.2001) (72) 発明者; および (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 竹中 透 (TAKE-NAKA, Toru) [JP/JP]; 〒351-0193 埼玉県和光市中央一丁目4番1号 株式会社 本田技術研究所内 Saitama (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語 (74) 代理人: 吉田 豊 (YOSHIDA, Yutaka); 〒170-0013 東京都豊島区東池袋一丁目20番2号 池袋ホワイトハウスビル816号 Tokyo (JP).
- (30) 優先権データ:
特願 2000-352011
2000年11月17日 (17.11.2000) JP (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS,
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 本田技研工業株式会社 (HONDA GIKEN KOGYO)

[続葉有]

(54) Title: GAIT PATTERN GENERATING DEVICE FOR LEGGED MOBILE ROBOT

(54) 発明の名称: 脚式移動ロボットの歩容生成装置



- A...INVERTED PENDULUM HORIZONTAL POSITION X_b
 B...UPPER BODY MASS POINT OFFSET
 C...UPPER BODY TYPICAL POINT
 D...UPPER BODY COORDINATE SYSTEM
 E...SWING LEG FLAT MASS POINT OFFSET
 F...SWING LEG FLAT
 G...INVERTED PENDULUM HEIGHT h
 H...ABSOLUTE COORDINATE SYSTEM (GLOBAL COORDINATE SYSTEM)
 I...ROBOT ZMP
 J...INVERTED PENDULUM ZMP (=ZMPpend)
 K...LOCAL COORDINATE SYSTEM

(57) Abstract: A legged mobile robot, particularly, a biped robot, wherein a dynamic model showing the relation between the motion of an upper body and a leg part and a floor reaction is provided, the parameters of gait patterns including the parameters determining the routes of the leg part are determined temporarily, the parameters of cyclic gait patterns followed by the gait patterns are estimated, the parameters of the gait patterns are corrected so that the routes of the upper body determined based on the dynamic model and the parameters of the gait patterns are converged to the routes of the upper body determined by the parameters of the cyclic gait patterns, and the instantaneous values of the gait parameters are determined based on the corrected parameters, whereby the gait patterns such as any step, turning angle, and walking frequency can be generated by generating freely and in real time the gait patterns including the floor reaction while meeting the requirements for dynamic equilibrium, the gait patterns allowing the continuous displacement and speed of each portion of the robot and a high allowance of stability can be generated in the boundaries between the generated gait patterns, and the gait patterns can be generated by predicting the future behavior of the robot so that an inconvenience such as an uncontrollable attitude is not produced.

[続葉有]



LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO,
NZ, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM,
TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZW.

添付公開書類:
— 国際調査報告書

- (84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (OH, OM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

脚式移動ロボット、特に2足歩行ロボットにおいて、上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデルを備え、脚部の軌道などを決定するパラメータを含む今回歩容のパラメータを仮決定し、今回歩容に続く周期的歩容のパラメータを想定し、動力学モデルと今回歩容のパラメータなどに基づいて決定される前記上体の軌道が、周期的歩容のパラメータから決定される上体の軌道に収束するように今回歩容のパラメータを修正し、修正したパラメータに基づいて今回歩容の瞬時値を決定する。これにより、床反力を含む歩容を動力学的平衡条件を満足しながら、自在かつリアルタイムに生成して任意の歩幅、旋回角、歩行周期などの歩容を生成することができると共に、生成された歩容同士の境界においてロボットの各部位の変位および速度が連続で、かつ安定余裕の高い歩容を生成することができる。また、ロボットの将来の挙動を予測して姿勢の発散などの不都合が生じないように歩容を生成することができる。

明細書

脚式移動ロボットの歩容生成装置

技術分野

この発明は脚式移動ロボットの歩容生成装置に関し、より詳しくは脚式移動ロボットにおいて、その歩容を自在かつリアルタイムに生成するようにしたものに関する。

背景技術

本出願人は先に特開平10-86081号において、オフラインで設計した基準歩容をパラメータと上体軌道の時系列の組にしてロボットに搭載したマイクロコンピュータのメモリに記憶させ、歩行周期など、時間に関するパラメータが同一である複数の歩容の瞬時値の重み付き平均を求めることによって、自在な歩容を生成する技術を提案している。

しかしながら、この提案技術においては、重み付き平均の算出に際して歩行周期などの時間的パラメータが異なる複数の基準歩容を単に時間パラメータも含めて重み付き平均を取ると、動力学的平衡条件が、近似的にも成立しなくなっていた。したがって、この提案手法では、基準歩容と異なる周期の歩容を生成することはできなかった。

尚、動力学的平衡条件とは、目標歩容の重力と慣性力から計算されるZMPが目標ZMPに一致していること、より詳細には、ロボットの慣性力と重力の合力が目標ZMPまわりに作用するモーメントの水平成分が0であることを意味する。また、ZMP (Zero Moment Point)は、運動による慣性力と重力の合力が床と交わる点を意味する。より厳密には、ロボットの運動による慣性力と重力の合力のモーメントの水平成分が0となる、床上の作用点を意味する。

また、上記した提案技術にあっては、1歩の歩容と次の1歩の歩容の境界において、上体の位置と速度の両方を連続にするために、場合によっては目標ZMPを理想の軌道から大きくずらす必要があったため、安定余裕が低下する場合もあ

った。

さらに、多様な歩行を実現するためには数多くの基準歩容の時系列データを記憶する必要があり、メモリ容量が増加する不都合があった。さらに基準歩容をオフラインで試行錯誤によって生成しなければならないと共に、基準歩容からかけ離れた歩容を生成しようとする、近似度が大きく低下する不都合があった。

ところで、歩容は物理法則に逆らうことができないので、その許容範囲内でZMPなどの歩容パラメータを生成する必要があり、しかも、2足歩行ロボットの動力学系は、ZMPを入力、上体位置を出力とする系とみなすと発散系になるので、生成した歩容パラメータによってロボットの挙動が発散しないように配慮する必要がある。尚、「発散」とは、後で触れる第8図に示すように、2足歩行ロボットの上体の位置が両足部（足平）の位置からかけ離れた位置にずれてしまうことを意味する。

その点から、リアルタイムに歩容を生成する場合、生成した歩容パラメータによってロボットに生じるであろう将来の挙動を予測し、発散する可能性があるときは発散を防止することが望ましい。

しかしながら、第28図に示すように、ロボット（2足歩行ロボット）を多質点系でモデル化すると、演算量が多くかつ非線形性が強くなるため、歩容の終端状態をリアルタイムに求めるのは、ロボットに搭載可能な通常のCPUの能力では困難である。

他方、将来挙動予測とそれに基づく発散防止制御は、多くの知識を蓄積しておき、歩容切り変わり目毎に、そのときの状態と目的に応じ、蓄積した知識に照らし合わせて目標歩容を選び出す手法でも、あるレベルまでは達成することができるであろうが、ありとあらゆる状況に対応しようとすれば組み合わせ爆発を起こし、事実上は不可能である。

したがって、脚式移動ロボットにおいて、リアルタイムに解析的に将来挙動が予測計算できるように、ロボットの動力学を記述する動力学モデルを単純化することが望まれていた。

動力学モデルとしては、従来から代表的なものとして次の2つが知られている。

1) 1質点モデル

2) 影響度の小さい質点を無視した多質点モデル

1質点モデルは、例えば特公平4-15068号公報で提案されており、その提案技術にあつては、質点を上体だけに設定した1質点系としてロボットをモデル化すると共に、上体の高さを一定にすることで、線形性を確保している。このモデルは挙動を解析的に求めることが容易である。

この提案技術に係るロボットは脚が極めて軽いので、脚反力を無視したことの影響は小さいが、通常の間人型の2足歩行ロボットの場合、脚部の質量が無視できないほど大きいことから、この提案技術によるときは近似精度が低下し、高速で歩行させると、最悪の場合、転倒する。

2) の影響度の小さい質点を無視した多質点モデルの例としては、「路面形状に偏差のある環境における2足歩行制御」(日本ロボット学会誌(JRSJ), Vol. 13, No. 7, Oct., 1995)を挙げるができる。

その提案技術にあつては、各脚の膝と足首および上体にそれぞれ質点が設定されている。より具体的には、各質点は、あるリンクまたは関節上にローカルに設定された座標系内のある固定された点(座標)に設定される。

このモデルでは、第23図に示すような全リンクに質点とイナーシャを設定する場合に比較すると、演算量が10分の1程度に減少する。また、上記した1質点モデルよりは、近似精度が高くなり、脚の質量が大きいロボットでも、この手法で生成した目標歩容を用いて歩行させることができる。

しかしながら、第23図に示した例と同様に、影響度の小さい質点を無視した多質点モデルにあつても、非線型性が依然強いので、解析的に将来挙動を予測して発散しないように対処することはできなかった。

発明の開示

したがって、この発明の第1の目的は、本出願人が先に特開平10-86081号において提案した技術や従来のモデル単純化技術の上記した不都合を解消し、脚式移動ロボットの床反力を含む歩容を、動力学的平衡条件をほぼ満足しながら、自在かつリアルタイムに生成して、任意の歩幅、旋回角、歩行周期などの歩

容を生成できるようにした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することにある。

さらに、この発明の第2の目的は、同様に先に提案した技術や従来のモデル単純化技術の上記した不都合を解消して脚式移動ロボットの歩容を自在かつリアルタイムに生成すると共に、生成された歩容同士の境界においてロボットの各部位の変位および速度が連続で、かつ安定余裕の高い歩容を生成できるようにした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することにある。

さらに、この発明の第3の目的は、ロボットの将来の挙動を予測して姿勢の発散などの不都合が生じないように歩容を生成できるようにした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することにある。

さらに、この発明の第4の目的は、高速演算を可能としてリアルタイムに歩容を生成できるようにした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することにある。

上記した目的を達成するために、請求の範囲の1項にあっては、少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、少なくとも前記上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデル、少なくとも要求に応じ、前記脚部の軌道と前記床反力の軌道を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段、少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段、前記動力学モデルおよび前記今回歩容のパラメータとそれに続く前記周期的歩容のパラメータに基づいて決定される前記上体の軌道が、前記周期的歩容のパラメータから決定される前記周期的歩容の前記上体の軌道に実質的に収束あるいは一致するように、少なくとも前記仮決定された今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段、および少なくとも前記修正された前記今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段を備えるように構成した。

上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデルを備え、要求に応じ、脚部の軌道などを決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメー

タを仮決定し、今回歩容に続く周期的歩容のパラメータを想定し、動力学モデルおよび今回歩容のパラメータとそれに続く周期的歩容のパラメータに基づいて決定される前記上体の軌道が、周期的歩容のパラメータから決定される上体の軌道に実質的に収束あるいは一致するように、少なくとも今回歩容のパラメータを修正し、修正今回歩容のパラメータに基づいて今回歩容の瞬時値を決定する如く構成したので、脚式移動ロボットの床反力を含む歩容を、動力学的平衡条件をほぼ満足しながら、自在かつリアルタイムに生成して、任意の歩幅、旋回角、歩行周期などの歩容を生成できるようにした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することができる。

さらに、生成された歩容同士の境界においてロボットの各部位の変位および速度が連続で、かつ安定余裕の高い歩容を生成することができると共に、ロボットの将来の挙動を予測して姿勢の発散などの不都合が生じないように歩容を生成することができる。さらに、高速演算を可能としてリアルタイムに歩容を生成することができる。尚、動力学モデルは、例えば特公平4-15068号公報で提案されるような1質点モデルであっても良い。

請求の範囲の2項にあっては、少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、少なくとも前記上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデル、少なくとも要求に応じ、前記脚部の軌道と前記床反力の軌道を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段、少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段、前記周期的歩容の前記パラメータに基づき、前記周期的歩容の前記上体の挙動を前記動力学モデルで近似したときの発散成分の歩容境界での値である、周期的歩容境界発散成分を決定する周期的歩容境界発散成分決定手段、前記今回歩容のパラメータに基づき、前記動力学モデルを用いて生成される今回歩容の終端における少なくとも前記発散成分が一致あるいは実質的に一致するように、前記今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段、および少なくとも前記修正された前記今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段を備える如く構成した

。これによって、請求の範囲の１項で述べたと同様の作用効果を得ることができる。

請求の範囲の３項にあっては、前記今回歩容と前記周期的歩容の間に過渡的な歩容が挿入される如く構成した。これによって、請求の範囲の１項で述べた作用効果に加え、周期的歩容を決定あるいは設定するときの制約条件（境界条件）が緩和され、一層所望の周期的歩容に近いものを設定することができるので、一層安定余裕を高めることができる。

請求の範囲の４項にあっては、前記周期的歩容が静止歩容を含む如く構成した。これにより、上記した作用効果に加え、前記周期的歩容境界発散成分の決定が容易となると共に、急停止における安定余裕を高めることができる。

請求の範囲の５項にあっては、少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力である脚部反力を前記上体の挙動に依存せず算出する脚部反力算出手段、少なくとも前記算出された脚部反力と目標床反力とから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位を算出する倒立振子モデル変位算出手段、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段、および少なくとも前記算出された上体位置を用いて歩容を生成する歩容生成手段を備える如く構成した。

脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力である脚部反力を上体の挙動に依存せずに算出し、それと目標床反力とから、上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置を算出し、それに基づいて倒立振子モデルの変位を算出し、それに基づいて前記上体の位置を算出すると共に、算出した上体位置を用いて歩容を生成する如く構成したので、脚式移動ロボットの動力学モデルを単純化して線形度を高めることができる。

即ち、脚式移動ロボットを２足歩行ロボットとするとき、倒立振子モデルでその動力学的挙動を記述すると共に、全ての力を床反力（より具体的にはZMP）相当値に換算しているので、ロボットの上体挙動を線形結合可能とすることがで

き、モデルの挙動が発散するか否かなどの挙動予測を、逐次、リアルタイムに演算することも可能となり、動力学的に一層安定した歩容を生成することができる。

請求の範囲の6項にあっては、少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力に疑似的に対応する前記脚部のZMPに相当する脚部ZMPを前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部ZMP算出手段、少なくとも前記算出された脚部ZMPと目標ZMPとから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位を算出する倒立振子モデル変位算出手段、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段、および少なくとも前記算出された上体位置を用いて歩容を生成する歩容生成手段を備える如く構成した。これにより、請求の範囲の5項で述べたと同様の作用効果を得ることができる。

請求の範囲の7項にあっては、前記倒立振子モデル支点位置算出手段は、前記目標ZMPに第1の係数を乗じて得た積から、前記脚部ZMPに第2の係数を乗じて得た積を減算して前記倒立振子モデルの支点位置を算出する如く構成した。これによってモデルの上体挙動を完全に線形結合可能とすることができ、モデルの挙動が発散するか否かなどの挙動予測を、逐次、リアルタイムに演算することができ、動力学的に一層安定した歩容を生成することができる。また、これによって歩行以外の動作もリアルタイムに生成できるようになるので、歩行以外の任意の動作と歩行を連続的に滑らかにつなげることも可能となる。

請求の範囲の8項にあっては、少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、少なくとも前記上体と脚部の運動と、ZMPとの関係を倒立振子を用いて表す動力学モデル、前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力である脚部反力を前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部反力算出手段と、少なくとも前記算出された脚部反力と目標床反力とから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子

モデルの支点位置を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段と、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位を算出する倒立振子モデル変位算出手段と、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段とから構成される動力学モデル、少なくとも要求に応じ、前記脚部の軌道と前記床反力の軌道を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段、少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段、前記周期的歩容の前記パラメータに基づき、前記周期的歩容の境界における前記倒立振子モデルの発散成分である周期的歩容境界発散成分を決定する周期的歩容境界発散成分決定手段、前記今回歩容のパラメータに基づき、前記動力学モデルを用いて生成される今回歩容の終端における前記倒立振子モデルの発散成分が前記周期的歩容境界発散成分に一致または実質的に一致するように、前記今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段、および少なくとも前記修正された今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段を備える如く構成した。これにより、請求の範囲の1項および5項で述べたと同様の作用効果を得ることができる。

請求の範囲の9項にあっては、前記床反力が少なくともZMPを含む如く構成した。これにより、請求の範囲の1項および5項で述べたと作用効果に加え、床反力の記述が容易となって上記した作用効果を一層良く奏することができる。

請求の範囲の10項にあっては、前記倒立振子モデルが線形モデルである如く構成した。これにより、請求の範囲の1項および5項、特に5項で述べたと同様の作用効果を得ることができる。

図面の簡単な説明

第1図は、この発明の一つの実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置を全体的に示す概略図である。

第2図は、第1図に示す脚式移動ロボットの足部の構造を示す説明断面図である。

第3図は、第1図に示す制御ユニットの詳細を示すブロック図である。

第4図は、第1図に示す脚式移動ロボットの歩容生成装置の構成を機能的に示すブロック図である。

第5図は、第4図に示す構成の中の歩容生成部で使用する、第1図に示す脚式移動ロボットを倒立振子で近似して得た動力学モデルを示す説明図である。

第6図は、第5図に示す動力学モデルを用いて第4図に示す歩容生成部が行う動力学演算を示すブロック図である。

第7図は、第4図に示す動力学モデルの倒立振子の支点位置を示すZMP相当値ZMPpend を演算するのに用いる、脚部の質点の慣性力と重力の合力の作用点Pの軌跡を示すタイム・チャートである。

第8図は、第1図に示す脚式移動ロボットにおいて上体軌道が発散した場合を示す説明図である。

第9図は、第4図に示す動力学モデルの倒立振子の支点位置を示すZMP相当値ZMPpend を離散関数化して示すタイム・チャートである。

第10図は、同様に第4図に示す動力学モデルの倒立振子の支点位置を示すZMP相当値ZMPpend の軌道を波形で示すタイム・チャートである。

第11図は、第10図に示すZMP相当値ZMPpend の波形を分解して示すタイム・チャートである。

第12図は、第1図に示す脚式移動ロボットの歩容生成装置の動作を示すフロー・チャートである。

第13図は、第12図フロー・チャートで使用する定常旋回歩容を着地位置などから説明する説明図である。

第14図は、同様に、第12図フロー・チャートで使用する定常旋回歩容の上体軌道を着地位置などから説明する説明図である。

第15図は、第12図フロー・チャートの定常旋回歩容の初期発散成分の算出作業を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

第16図は、第15図フロー・チャートで算出される初期発散成分に基づいて第12図フロー・チャートにおいて今回歩容の歩容パラメータである目標ZMPを修正する動作を説明するタイム・チャートである。

第17図は、第12図フロー・チャートの初期発散成分に基づく今回歩容の歩容パラメータの目標ZMPの修正動作を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

第18図は、第12図フロー・チャートの今回歩容の瞬時値算出作業を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

第19図は、第1の実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置によって生成される歩容の中の上体軌道を示すタイム・チャートである。

第20図は、この発明の第2の実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置の動作の中の、定常旋回歩容の初期発散成分の算出作業を示す、第15図に類似するサブルーチン・フロー・チャートである。

第21図は、第2の実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置の動作の中の、今回歩容の歩容パラメータの目標ZMPの修正動作を示す、第17図に類似するサブルーチン・フロー・チャートである。

第22図は、この発明の第3の実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置で使用される定常旋回歩容の設定例を示す、第13図と同様の説明図である。

第23図は、脚式移動ロボットである2足歩行ロボットの全リンクに質点を設定した例を示す説明図である。

発明を実施するための最良の形態

以下、添付図面を参照してこの発明の一つの実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置を説明する。尚、脚式移動ロボットとしては2足歩行ロボットを例にとる。

第1図は、この実施の形態に係る歩容生成装置が適用される脚式移動ロボット、より具体的には2足歩行ロボットを全体的に示す概略図である。

図示の如く、2足歩行ロボット（以下「ロボット」という）1は左右それぞれの脚部（脚部リンク）2に6個の関節を備える。6個の関節は上から順に、股（腰部）の脚部回旋（回転）用の関節10R、10L（右側をR、左側をLとする。以下同じ）、股（腰部）のロール方向（X軸まわり）の関節12R、12L、

股（腰部）のピッチ方向（Y軸まわり）の関節14R, 14L、膝部のピッチ方向の関節16R, 16L、足首のピッチ方向の関節18R, 18L、同ロール方向の関節20R, 20Lから構成される。

関節18R（L）, 20R（L）の下部には足平（足部）22R, 22Lが装着されると共に、最上位には上体（基体）24が設けられ、その内部にマイクロコンピュータからなる制御ユニット26（後述）などが格納される。上記において、股関節（あるいは腰関節）は関節10R（L）, 12R（L）, 14R（L）から、足関節（足首関節）は関節18R（L）, 20R（L）から構成される。また股関節と膝関節とは大腿リンク28R, 28L、膝関節と足関節とは下腿リンク30R, 30Lで連結される。

尚、上体24の上部には腕が取り付けられると共に、その上部には頭部が配置されるが、その詳細は、この発明の要旨と直接の関連を有しないため、省略する。

上記の構成により、脚部2は左右の足についてそれぞれ6つの自由度を与えられ、歩行中にこれらの $6 \times 2 = 12$ 個の関節を適宜な角度で駆動することで、足全体に所望の動きを与えることができ、任意に3次元空間を歩行させることができる（この明細書で「*」はスカラに対する演算としては乗算を、ベクトルに対する演算としては外積を示す）。

尚、この明細書で後述する上体24の位置およびその速度は、上体24の所定位置、具体的には上体24の代表点の位置およびその移動速度を意味する。それについては後述する。

第1図に示す如く、足関節の下方には公知の6軸力センサ34が装着され、力の3方向成分 F_x , F_y , F_z とモーメントの3方向成分 M_x , M_y , M_z とを測定し、足部の着地の有無および床反力（接地荷重）などを検出する。また、上体24には傾斜センサ36が設置され、Z軸（鉛直方向（重力方向））に対する傾きとその角速度を検出する。また各関節の電動モータには、その回転量を検出するロータリエンコーダが設けられる。

第2図に示すように、足平22R（L）の上方には、ばね機構38が装備されると共に、足底にはゴムなどからなる足底弾性体40が貼られてコンプライアン

ス機構 4 2 を構成する。ばね機構 3 8 は具体的には、足平 2 2 R (L) に取り付けられた方形状のガイド部材 (図示せず) と、足首関節 1 8 R (L) および 6 軸力センサ 3 4 側に取り付けられ、前記ガイド部材に弾性材を介して微動自在に収納されるピストン状部材 (図示せず) とからなる。

図中に実線で表示された足平 2 2 R (L) は、床反力を受けていないときの状態を示す。床反力を受けると、コンプライアンス機構 4 2 においてバネ機構 3 8 と足底弾性体 4 0 がたわみ、足平 2 2 R (L) は図中に点線で表示された位置姿勢に移る。この構造は、着地衝撃を緩和するためだけでなく、制御性を高めるためにも重要なものである。尚、その詳細は本出願人に先に提案した特開平 5 - 3 0 5 5 8 4 号に記載されているので、詳細な説明は省略する。

さらに、第 1 図では図示を省略するが、ロボット 1 の適宜な位置にはジョイスティック 4 4 が設けられ、外部から必要に応じて直進歩行しているロボット 1 を旋回させるなど歩容に対する要求を入力できるように構成される。

第 3 図は制御ユニット 2 6 の詳細を示すブロック図であり、マイクロ・コンピュータから構成される。そこにおいて傾斜センサ 3 6 などの出力は A/D 変換器 (図に「A/D」と示す) 5 0 でデジタル値に変換され、その出力はバス 5 2 を介して RAM 5 4 に送られる。また各電動モータに隣接して配置されるエンコーダの出力はカウンタ 5 6 を介して RAM 5 4 内に入力される。

制御ユニット 2 6 の内部にはそれぞれ CPU からなる第 1、第 2 の演算装置 6 0、6 2 が設けられており、第 1 の演算装置 6 0 は後述の如く、目標歩容を生成すると共に、後述の如く関節角変位指令を算出し、RAM 5 4 に送出する。また第 2 の演算装置 6 2 は RAM 5 4 からその指令と検出された実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な操作量を算出して D/A 変換器 (図に「D/A」と示す) 6 6 とサーボアンプを介して各関節を駆動する電動モータに出力する。

第 4 図は、この実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置の構成および動作を全体的に示すブロック図である。

以下説明すると、この装置は歩容生成部 1 0 0 を備え、歩容生成部 1 0 0 は後述の如く目標歩容を自在かつリアルタイムに生成して出力する。目標歩容は、目標上体位置姿勢 (軌道)、目標足平位置姿勢 (軌道)、目標全床反力中心点 (目

標ZMP) (軌道) および目標全床反力 (軌道あるいはパターン) からなる。

尚、各足平22R, Lの床反力を「各足平床反力」と呼び、全ての(2本の)足平の床反力の合力を「全床反力」と呼ぶ。ただし、以降においては、各足平床反力はほとんど言及しないので、断らない限り、「床反力」は「全床反力」と同義として扱う。

最初にこの装置が生成する歩容について説明すると、この発明の目的は前記したように歩容をリアルタイムに生成する装置を提供することであり、より具体的には本出願人が先に特開平10-277969号公報において提案した複合コンプライアンス制御によるロボットの姿勢安定化制御を行うために必要な目標歩容を自在に生成することを目的としている。

その先に提案した姿勢安定化制御にあつては、床反力中心点(ZMP)の目標位置と実測位置の偏差を検出し、その偏差を解消するように脚部の一方または双方を駆動して姿勢の安定化を図っている。それと共に、ロボットが倒れそうになると、目標床反力を意図的にずらすことによって実床反力をずらし、姿勢復元力を得るようにしている。

かかる如く、脚式移動ロボットにおいては、目標運動軌跡と目標床反力パターンの関係が動学的平衡条件を満足していなければ、安定した歩行が実現できない。動学的平衡条件は前記した如く、具体的には、例えば、目標床反力中心点(目標床反力分布の2次モーメントが0になる床上的作用点)とZMPが一致することである。一致していないと、コンプライアンス制御が働いたときに、慣性力と重力の合力と床反力との間のバランスを崩し、最悪の場合、転倒する。

先に提案した技術においては、それをロボットが不安定となったときの姿勢回復に逆用しているが、上記から明らかな如く、本出願人が提案する脚式移動ロボットにおいてはこのように歩行制御に与える目標値として、目標の運動パターンだけではなく、目標の運動パターンに対して動学的平衡条件を満足する目標床反力パターンも必要である。

目標床反力は、一般的には、作用点とその点に作用する力と力のモーメントによって表現される。作用点はどこにとっても良いので、同一の目標床反力でも無数の表現が考えられるが、特に前述の目標床反力中心点を作用点にして目標床反

力を表現すると、力のモーメントは、床に垂直な成分を除けば、0になる。

尚、前述のように、動力学的平衡条件を満足する歩容では、目標とする運動軌跡から算出されるZMPと目標床反力中心点は一致することから、目標床反力中心点軌道の代わりに目標ZMP軌道を与えても同じことである。

従って、上記は、「歩行制御に与える目標値としては、目標運動軌跡だけでなく、目標ZMP軌道（目標床反力パターン）も必要である」と言い換えることができる。このような背景から、この明細書では目標歩容を、次のように定義する。

a) 広義の目標歩容とは、1歩ないしは複数歩の期間の目標運動軌跡とその目標床反力パターンの組である。

b) 狭義の目標歩容とは、1歩の期間の目標運動軌跡とそのZMP軌道の組である。

c) 一連の歩行は、いくつかの歩容がつながったものとする。

尚、以下では、理解を容易にするために、特にことわらない限り、目標歩容は狭義の目標歩容の意味で使用する。より詳しくは、この明細書では目標歩容は、両脚支持期の初期から片脚支持期の終端までの意味で使用する。

また、両脚支持期とは言うまでもなく、ロボット1がその自重を脚部リンク2の双方で支持する期間を、片脚支持期とは脚部リンク2の一方で支持する期間をいう。片脚支持期においてロボット1の自重を支持しない側の脚部（リンク）を「遊脚」と呼ぶ。定義の詳細は、先に提案した特開平10-86081号公報に記載されているので、この程度の説明に止める。

この発明は、具体的には、上記に定義した目標歩容を自在かつリアルタイムに生成することを目的とする。自在かつリアルタイムに生成できれば、例えばロボット1を遠隔操縦によってオペレータが自由自在に操ることができ、また、自動操縦においても、単なる固定シーケンス通りに移動するだけでなく、誘導制御やデリケートな位置決めも可能となる。

ここで、目標歩容としての条件を説明する。

目標歩容が満たさなければならない条件は、大きく分けて以下の5つに分類される。

条件1) 動力学平衡条件を満足していること。即ち、ロボット1の目標運動軌跡から動学的に算出されるZMP軌道が目標ZMP軌道と一致していること。

条件2) ロボット1の歩行計画部や歩行経路誘導部(共に図示せず)、あるいはオペレータから歩幅や旋回角など歩容が満たすべき条件が要求される場合、それらの要求条件を満たしていること。

条件3) 足平が床を掘ったり擦ったりしない、関節角度が可動範囲を越えない、関節速度が限界を越えないなどの、キネマティクス(運動学)に関する制約条件を満たしていること。

条件4) 片脚支持期においてZMPが支持脚足平接地面内になければならない、駆動系の最大能力を越えないなどの、動力学に関する制約条件を満たしていること。

条件5) 境界条件を満たしていること。即ち、条件1)の当然の帰結として、歩容と歩容の境界では、少なくとも、各部位の位置と速度が連続であるという境界条件が導かれる(不連続であれば、無限大の力が発生したり、ZMPが接地面からはるかに遠くの点に移動してしまうから)。

また、第 $n+1$ 回歩容の初期状態は、第 n 回歩容の終端状態(特に、足平位置に対する上体の位置・姿勢および速度)に一致するように設定されなければならない。このとき、第 n 回歩容の終端状態は、第 $n+1$ 回歩容の初期状態が決まっていれば、第 $n+1$ 回歩容の初期状態に一致させれば良い。

決まっていなければ、第 n 回歩容の終端状態が、姿勢が崩れないで長期的な歩行ができる範囲に入っていれば良い。但し、後述するように、姿勢が崩れないで長期的な歩行ができるための終端状態の範囲を求めることは、極めて難しい。

一般的に、目標歩容は、パラメータ値あるいは時系列テーブルを含む歩容発生アルゴリズムによって発生させられる(歩容を決定するということは、パラメータ値あるいは時系列テーブルを適当に設定することに他ならない)。

パラメータ値あるいは時系列テーブルを変えることによって、様々な歩容が生成される。しかし、パラメータ値あるいは時系列テーブルを十分な配慮もせずに設定しただけでは、作成された歩容が前記の歩容条件をすべて満足しているか否かは分からない。

特に、長期的歩行に適した終端上体位置および速度の範囲が分かっていたとしても、ZMP軌道に基づいて上記した条件1)を満足する上体の軌道を歩容発生アルゴリズムに従って生成する場合には、発生した歩容の終端での上体位置と速度の両方がその範囲に入るようにZMP軌道に関するパラメータを設定することは、極めて難しい。

その理由は次の通りである。

理由1) 上体は、一旦、ZMPから遠くに離れると、さらに遠くに離れようとする発散傾向がある。これを説明するために、ロボットの上体の挙動に近い倒立振子の挙動を例に挙げる。

倒立振子は重心の床投影点が支点からずれると、ずれが発散して倒れる。しかし、そのときも倒立振子の慣性力と重力の合力は支点上に作用し(即ち、ZMPが支점에一致し)、支点から受ける床反力に釣り合っている。即ち、動力学的平衡条件は、運動する物体のその瞬間における慣性力と重力と床反力の関係を表すだけのものである。

動力学的平衡条件を満足していればロボットの長期歩行が保証されたように錯覚しやすいが、ロボットの姿勢が崩れているか否かとは全く関係がない。倒立振子の重心が支点の真上から離れると、ますます遠くに離れようとする傾向があるように、ロボットの重心がZMPの真上から遠くに離れるとますます遠くに離れようとする発散傾向がある。

理由2) 片脚支持期においてZMPが支持脚足平接地面内になければならないなどの厳しい制約条件があるために、上体の加減速パターンを恣意的に設定することができず、位置を合わせようとする速度が合わず、速度を合わせようすると位置が合わず、なかなか両方を同時に一致させることは難しい。以上の問題点のために、前記歩容条件を全て満たした目標歩容のパラメータやテーブルなどのオフラインで設計した基準歩容を持たず、完全にリアルタイムに決定することは、先に提案した技術も含めて従来では不可能であった。

歩容の説明を続けると、歩容は、歩容パラメータによって記述される。歩容パラメータは、運動パラメータとZMPパラメータ(より一般的に表現すれば、床反力パラメータ)から構成される。尚、この明細書で「床反力パラメータ」なる

語は、「床反力の時間的なパターンに関するパラメータ」を意味するものとして使用する。ZMPパラメータは後で第16図に示すように、X, Y, Z座標（方向）について折れ線グラフ状のZMP軌道の折れ点の位置と通過時刻で示す（X座標のみ図示）。

運動パラメータは、足平（軌道）パラメータと上体（軌道）パラメータとから構成される。

足平軌道パラメータは、初期（離床時）遊脚位置および姿勢、終端（着床時）遊脚位置および姿勢、両脚支持期時間、片脚支持期時間などを含む。これらに基づき、先に本出願人が特開平5-318889号および特開平5-324115号公報などで提案した技術を用いて、両足平の位置（ x_f , y_f , z_f ）および姿勢（ θ_{xf} , θ_{yf} , θ_{zf} ）の瞬時値が求められる。尚、ここで姿勢は「空間上の傾斜または向き」を意味する。

上体軌道パラメータは、上体の姿勢（空間上の上体24の向きあるいは傾き）を決定するパラメータ、上体高さ（Z方向の値）を決定するパラメータ、初期の上体位置（変位）および速度パラメータなどから構成される。

上体の位置および姿勢を決定するパラメータに基づき、時間関数または先に特開平5-324115号公報で本出願人が提案した技術や後述する手法から上体の水平位置（ x_b , y_b ）および姿勢（ θ_{xb} , θ_{yb} , θ_{zb} ）の瞬時値が求められる。上体高さ z_b は適宜な手法、例えば本出願人が特開平10-86080号公報で提案する手法で決定される。

脚式移動ロボット1の関節は第1図に示すように12関節から構成されているので、得られた両足平の位置・姿勢と上体位置・姿勢とから、後述するように逆キネマティクス演算によって目標関節変位が一義的に決定される。即ち、今回のロボットの目標姿勢が一義的に決定される。

ところで、理想的目標歩容は、物理法則に逆らうことができないので、希望する状態にすぐに到達することはできない。許容範囲内でZMPの軌道、着地位置および着地時期などの歩容パラメータを変更することによって、時間をかけて希望する状態に移移しなければならない。特に、この実施の形態において2足歩行ロボットの動力学系は、ZMPを入力、上体位置を出力とする系とみなすと発散

系になるので、慎重に歩容パラメータを変更しないと、正常な状態に復元するのが困難となる。

したがって、目標歩容を自在かつリアルタイムに生成するときは、ロボットの将来の挙動を予測し、どのように歩容パラメータ値を設定すれば、ロボットの将来、例えば数歩先の挙動が発散しないか否かを判断すると共に、発散する可能性が予測されるときは発散を防止するように歩容を調整することが、望ましい。

しかしながら、前記したように、第19図に示すような多質点系モデルを用いるとき、その動力学演算は、演算量が多くかつ非線形性が強いので、終端状態をリアルタイムに求めるのは、ロボットに搭載可能な通常のCPU（第1の演算装置60）の能力では困難である。

他方、将来挙動予測とそれに基づく発散防止制御は、多くの知識を蓄積させておき、歩容切り変わり目毎に、そのときの状態と目的に応じ、知識に照らし合わせて目標歩容を選び出す手法でも、あるレベルまでは達成することができるであろうが、ありとあらゆる状況に対応することは、組合わせ爆発を起こし、事実上不可能である。

そこで、この実施の形態においては、ロボット1の動力的挙動を記述する動力学モデルを単純化し、リアルタイムかつ解析的に将来挙動が予測計算できるようにした。第5図に、その単純化した動力学モデルを示す。図示の如く、この動力学モデルは3質点モデルであり、デカップルド、即ち、脚部の動力学と上体の動力学が相互に非干渉に構成されると共に、ロボット全体の動力学は、それらの線形結合で表される。第6図は、歩容生成部100の動力学演算部において第5図に示す動力学モデルを用いて行われる動力学演算を示すブロック図である。

以下、この動力学モデルを説明する。

- 1) このモデルは、倒立振子、支持脚足平質点、遊脚足平質点の3質点から構成される。
- 2) 支持脚足平質点は、支持脚足平にローカルに設定された座標系（具体的には、原点が足首中心から足底への垂直投影点、XY平面が足底に一致し、かかとからつまさきへの向きをX軸にとったXYZ直交座標系であり、これを以降、「支持脚ローカル座標系」と呼ぶ）上のある固定された点に設定される。この固定さ

れた点の支持脚ローカル座標系上の座標を、「支持脚足平質点オフセット」と呼ぶ。

同様に、遊脚足平質点は、遊脚足平にローカルに設定された座標系（これを以降、「遊脚ローカル座標系」と呼ぶ）上のある固定された点に設定される。この固定された点の遊脚ローカル座標系上の座標を、「遊脚足平質点オフセット」と呼ぶ。

尚、支持脚が床に全面的に密着しているときの足首位置の床への鉛直投影点を原点とし、床に固定され、支持脚足平の前方向をX軸、左方向をY軸、鉛直方向をZ軸にとった座標系を「支持脚座標系」と呼ぶ（これは、上記した支持脚ローカル座標とは異なる。）。ことわらない限り、位置、速度、力などは支持脚座標系で示す。

3) 倒立振子は、水平に移動するフリーの支点aと、ひとつの質点bと、支点と質点を結ぶ質量のない可変長のリンクcから構成される。また、リンクが傾いてもリンクが伸縮し、支点から見た質点高さが一定値に保たれるものとする。（換言すれば、この倒立振子は、前記した特公平4-15068号公報に記載されるロボットの線形倒立振子と同一である。）

倒立振子質点は、物理的意味としては上体24の質点（必ずしも重心位置を意味しない）に対応する。したがって、倒立振子質点と上体質点は、今後、同意語として扱う。倒立振子質点の位置（より広義に言えば変位）を、以降、略して「倒立振子位置」と呼ぶ。

4) 上体の水平位置は、倒立振子の水平位置から幾何学的に決定される。具体的には、例えば、上体にローカルに設定された座標系（これを以降、「上体座標系」と呼ぶ）上のある固定された代表点（この点を以降、「上体代表点」と呼ぶ）の水平位置（支持脚座標系から見たXY座標）が、倒立振子の水平位置に一致するように決定される。即ち、第5図に示すように、上体代表点と倒立振子質点bは、同一鉛直線上にあるように決定される。

上体代表点の上体座標系上の水平座標（XY座標）を「上体質点オフセット」と呼ぶ。

次いで、図示の動力学演算モデルに関する変数およびパラメータなどの記述法

について説明する。

説明の便宜上、動力学演算モデルに関する変数およびパラメータなどを以下のように定義し、記述する。

倒立振子のZMPは、支点aの位置にある。なぜなら、ZMPは定義からモーメントが発生しない点のことであり、フリーの支点aにはモーメントが発生しないからである。そこで、倒立振子支点位置を倒立振子自身のZMP位置（ZMP相当値）ということで、以降、「倒立振子ZMP」と呼び、「ZMPpend」と記述する。

各質点の質量と位置は次のように記述する。

msup : 支持脚質点質量

mswg : 遊脚質点質量

mb : 倒立振子質点質量（上体質点質量）

mtotal : ロボット質量 (= mb + msup + mswg)

mfeet : 両脚質量 (= msup + mswg)

xsup : 支持脚質点位置

xswg : 遊脚質点位置

xb : 倒立振子位置（上体質点位置）

以降、ことわらない限り、xbは3次元ベクトル（XYZ座標ベクトル）で表わす。倒立振子の高さは、倒立振子の支点から質点までの高さを意味し、hと記述する。

$d(xb)/dt$ はxbの1階微分を表わし、倒立振子の速度を示す。 $d^2(xb)/dt^2$ はxbの2階微分を表わし、倒立振子の加速度を示す。gは重力加速度定数を示す。Gは重力加速度ベクトルを示し、X、Y成分が0、Z成分が $-g$ であるベクトルと定義する。

図示の3質点モデルにおいて、脚質点の総慣性力がある作用点Pまわりに作用するモーメントを、点Pまわりの脚総慣性力モーメントと定義する（慣性力と重力の合力を「総慣性力」と呼ぶ）。作用点Pの座標（あるいは位置）をxpと置く。

下記の数式1は、点Pまわりの脚総慣性力モーメントの厳密な動力学的定義式

である。

点Pまわりの脚総慣性力モーメント

$$= m_{sup}(x_{sup} - x_p) * G - m_{sup}(x_{sup} - x_p) * d^2(x_{sup}) / dt^2 \\ + m_{swg}(x_{swg} - x_p) * G - m_{swg}(x_{swg} - x_p) * d^2(x_{swg}) / dt^2$$

・・・数1

脚ZMPをZMPfeetと記述し、脚ZMPを数式2で定義する。ただし、脚ZMPの高さ（ZMPfeetのZ成分）は、点P位置の高さと同じとする。このように、脚ZMPは、脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力（総慣性力）に疑似的に対応させた値である。

$$\text{点Pまわりの脚総慣性力モーメント} = m_{feet} * (ZMPfeet - x_p) * G$$

・・・数2

本来、第1図に示すロボット1の動力学は非線形であるが、近似して目標ZMP、脚ZMP（ZMPfeet）、および倒立振子ZMP（ZMPpend）の間には数式3の線形関係を与える。

$$ZMPpend = m_{total} / m_b * \text{目標ZMP} - m_{feet} / m_b * ZMPfeet$$

・・・数3

一般に、線形倒立振子の挙動を表わす微分方程式は、数式4で表わされる。

$$d^2(x_b) / dt^2 \text{の水平成分} = g / h * (x_b \text{の水平成分} - ZMPpend \text{の水平成分})$$

・・・数4

ただし、作用点Pは、モデルの近似精度が高くなるように設定される。例えば、作用点Pは、第7図タイム・チャートに示すように、直前（前回）歩容の支持脚座標系上の原点から、今回歩容の支持脚座標系の原点に、両脚支持期の間に直線的に等速移動する点に設定される。

この実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置で提案する動力学モデルは、第5図に示すような足平、上体と各質点の位置の関係を表わす前記オフセ

ットと、上記の数式（数式1から4）で表わされる。これにより、後述の如く、将来挙動予測が容易となった。

第6図を参照して歩容生成部100（第1図に示す）の動力学演算部の動作を説明すると、動力学演算部は脚ZMP算出器200を備え、脚ZMP算出器200は、数式1および数式2ならびに第7図で示される作用点Pに基づいて脚ZMP（ZMPfeet）を算出する。

次いで、上記算出したZMPfeetを $m_{\text{feet}}/m_{\text{total}}$ 倍したものを、目標ZMPから減じ、さらに因って得た差を m_{total}/m_b 倍することによって、倒立振子ZMP（ZMPpend）を算出する。即ち、倒立振子ZMP（ZMPpend）は、前記ロボットの質量 m_{total} と前記上体の質点の質量 m_b の比に前記目標ZMPを乗じて得た積から、前記脚部の質量 m_{feet} と前記上体の質点の質量 m_b の比に脚部のZMP相当値ZMPfeetを乗じて得た積を減算して算出される。この処理は、数式3に相当する。

倒立振子の挙動は、数式4で表現され、倒立振子ZMP（ZMPpend）から倒立振子質点水平位置 x_b が算出される。

さらに、第6図に示す如く、動力学演算部は上体位置決定器202を備え、上体位置決定器202は、倒立振子質点水平位置から上体の水平位置 x_b を決定する。具体的には、上体位置決定器202は、前述した上体代表点（第5図に示す）の水平位置が、倒立振子の水平位置に一致するように上体の水平位置を決定する。

次いで、歩容の継続的姿勢安定性について述べる。

ここまで述べてきた動力学モデル自身は、単に、各瞬間における動力学的平衡条件を近似的に満足するように、目標ZMPから上体軌道を算出するだけのものであり、上体軌道が発散すること（第8図に示すように上体24の位置が両足平22R、Lの位置からかけ離れた位置にずれてしまうこと）を防止するものではない。

以下では、上体軌道が発散を防止し、上体と両足平の間の適切な位置関係を継続させるための手段について説明する。

最初に、そのための予備知識として、将来の上体軌道を解析的に求める上で特に重要な、線形倒立振子の性質について議論する。ここでは、離散化モデルを用

いて説明する。

まず、倒立振子に関し、新たに以下の変数やパラメータを定義する。

ω_0 : 倒立振子の固有角周波数

$\omega_0 = \text{sqrt}(g/h)$ (ただし、sqrtは平方根を表わす。)

Δt : 刻み時間

$x[k]$: k ステップ目 (時刻 $k\Delta t$) の倒立振子位置

$v[k]$: k ステップ目の倒立振子速度

$ZMP_{\text{pend}}[k]$: k ステップ目の倒立振子ZMP (詳しくは、時刻 $k\Delta t$ から時刻 $(k+1)\Delta t$ まで、入力 $ZMP_{\text{pend}}[k]$ の0次ホールドした信号が入力、即ち、その時刻の間は同一信号が倒立振子に入力され続けられるものとする。)

さらに、 $q[k]$ と $p[k]$ を数式5で定義する。

$$q[k] = x[k] + v[k]/\omega_0$$

$$p[k] = x[k] - v[k]/\omega_0$$

・・・数5

倒立振子の運動方程式を離散化し、 $q[k]$ と $p[k]$ に関して解くと、以下の数式6と数式7が得られる。尚、expは指数関数(自然対数)を表す。

$\hat{p}[k]$

$$= \exp(-\omega_0 k \Delta t) * (p[0] + (\exp(\omega_0 \Delta t) - 1) \sum_{i=0}^{k-1} (\exp(i \omega_0 \Delta t) * ZMP_{\text{pend}}[i]))$$

・・・数6

$q[k]$

$$= \exp(\omega_0 k \Delta t) * (q[0] + (\exp(-\omega_0 \Delta t) - 1) \sum_{i=0}^{k-1} (\exp(-i \omega_0 \Delta t) * ZMP_{\text{pend}}[i]))$$

・・・数7

これらの式の意味を考える。

ある有限な定数 ZMP_{min} および ZMP_{max} に対し、数式8を常に満足するように、 $ZMP_{\text{pend}}[i]$ が設定されるものと仮定する。

$$ZMP_{\text{min}} \leq ZMP_{\text{pend}}[i] \leq ZMP_{\text{max}}$$

・・・数8

数式 8 の中辺と右辺の関係を、数式 6 に代入すると、下記の数式 9 が得られる。

$$p[k] \leq \exp(-\omega_0 k \Delta t) * (p[0] + (\exp(\omega_0 \Delta t) - 1) \sum_{i=0}^{k-1} (\exp(i \omega_0 \Delta t) * ZMP_{\max}))$$

・・・数 9

等比級数の和の定理から、下記の数式 10 が得られる。

$$\sum_{i=0}^{k-1} \exp(i \omega_0 \Delta t) = (1 - \exp(k \omega_0 \Delta t)) / (1 - \exp(\omega_0 \Delta t))$$

・・・数 10

したがって、数式 9 は、数式 11 のように書き直すことができる。

$$p[k] \leq \exp(-\omega_0 k \Delta t) * p[0] + (1 - \exp(-\omega_0 k \Delta t)) * ZMP_{\max}$$

・・・数 11

同様に、数式 8 の左辺と中辺の関係から、数式 12 を得ることができる。

$$p[k] \geq \exp(-\omega_0 k \Delta t) * p[0] + (1 - \exp(-\omega_0 k \Delta t)) * ZMP_{\min}$$

・・・数 12

$\exp(-\omega_0 k \Delta t)$ は、 k が無限大になると 0 に収束（漸近）するので、数式 11、12 は、 ZMP_{pend} が変動しても $p[k]$ は発散せず、いずれは ZMP_{\max} と ZMP_{\min} の間に入ることを意味する。

さらに、具体例として、 ZMP_{pend} がある時点以降、一定値 ZMP_0 になる場合を考える。この場合、その時点を改めて時刻 0 とすると、数式 8 は、数式 13 のように書き直すことができる。これは、 $p[k]$ が、その初期値にかかわらず、 ZMP_0 に等比級数的に収束することを意味する。

$$p[k] = \exp(-\omega_0 k \Delta t) * (p[0] - ZMP_0) + ZMP_0$$

・・・数 13

より一般的には、 $p[k]$ は、ある時点でどのような値であっても、その後の ZMP_{pend} 波形がある同一波形であれば、 ZMP_{pend} 波形に追従する、ある軌道に収

束する。

一方、 $q[k]$ は、数式 7 から明らかなように発散する傾向がある。

具体例として、ZMPpend がある時点以降、一定値 ZMP0 になる場合を考える。この場合、一定値 ZMP0 になる時点を改めて時刻 0 とすると、数式 7 は、数式 14 となり、これは、 $q[0] = ZMP0$ ではない限り、 $q[k]$ が、ZMP0 から等比級数的に発散することを意味する。

$$q[k] = \exp(\omega_0 k \Delta t) * (q[0] - ZMP0) + ZMP0$$

・・・数 14

そこで、以降、数式 5 によって定義される $p[k]$ を収束成分、 $q[k]$ を「発散成分」と呼ぶ。

以上より、上体軌道の発散を防止し、上体と両足平の間の適切な位置関係を継続させるためには、事実上、収束成分は無視して構わず、支持脚から見た発散成分を歩行に支障ない範囲から越えないように管理することが重要とすることができる。

より具体的には、発散成分を歩行に支障ない範囲（姿勢が大きく崩れない範囲）から越えないように、ZMP 軌道パラメータなどを適切に決定することが重要であると言える。尚、上体挙動を線形化しなければ、上体挙動を求める式が、数式 6, 7 のように発散成分と収束成分に分離した式にすることができないので、上記のような議論を展開することができなかったが、この実施の形態において可能となった。

収束成分と発散成分の性質を以下に列挙する。

性質 1：対称性

収束成分 $p[k]$ と発散成分 $q[k]$ を求める式の違いは、 $p[k]$ と $q[k]$ が置き換わったことと、 ω_0 が $-\omega_0$ に置き換わったことだけである。

性質 2：等価換算

上記性質から、以下では発散成分についてのみ議論する。

入力 ZMPpend[i] として、ZMPpend[0] = U_0 と、ZMPpend[i] = 0 ($i = 1, 2, \dots$) で表わされるパルスを考えると、そのときの $q[k]$ は、数式 7 にこの ZMPpend[

1]を代入することにより得られ、数式15となる。

$$q[k] = \exp(\omega_0 k \Delta t) (q[0] + (\exp(-\omega_0 \Delta t) - 1)U_0)$$

・・・数15

これより、発散成分 $q[k]$ に対する影響だけを考えると、初期パルス U_0 を入力することは、 $U_0 * (\exp(-\omega_0 \Delta t) - 1)$ だけ初期発散成分をずらすことと同じ影響を与える。即ち、初期パルスは、 $(\exp(-\omega_0 \Delta t) - 1)$ 倍することによって、初期発散成分に等価換算される。

また、数式7と数式15を比較することにより、発散成分 $q[k]$ に対する影響だけを考えると、入力 $ZMPpend[i] (i=0, 1, 2, \dots, k-1)$ を入力することは、数式16に示す初期パルス入力 U_0 と同じ影響を与える。

$$U_0 = \sum_{i=0}^{k-1} (\exp(-\omega_0 i \Delta t) * ZMPpend[i])$$

・・・数16

即ち、入力 $ZMPpend[i] (i=0, 1, 2, \dots, k-1)$ は、数式16によって、初期パルス入力 U_0 に等価換算される。

性質8：時間遅れの影響

また、第9図に示すように、 $ZMPpend[i]$ がある関数 $f(i)$ であり、 $ZMPpend'[i]$ が関数 $f(i)$ を時間 $n \Delta t$ だけ遅らせた関数 $f(i - n \Delta t)$ であるとし、入力列 $ZMPpend[i]$ を初期パルスに変換したものを U_0 、入力列 $ZMPpend'[i]$ を初期パルスに変換したものを U_0' とすると、 U_0' は数式17のようになる。

$$U_0' = U_0 * \exp(-n \omega_0 \Delta t)$$

・・・数17

即ち、同一波形の入力を時間 $n \Delta t$ だけ遅らせて入力すると、その入力によって発生する発散成分は、 $\exp(-n \omega_0 \Delta t)$ 倍になる。

次いで、第5図に示す倒立振子モデルに、複雑な倒立振子ZMP波形を入力したときの発散成分について述べる。

ところで、第5図（または数式3）に示す動力学モデル内の倒立振子モデルに

与えられるZMP入力は、目標ZMPに $mtotal/mb$ を乗じたものと、脚ZMPに $mfeet/mb$ を乗じたものの差である。目標ZMPは具体的には、折れ線状の波形であるので、目標ZMPに $mtotal/mb$ を乗じたものも、やはり折れ線の波形である。

そこで、以下では、折れ線状のZMPが倒立振子に入力されたことによって発生する発散成分を解析的に求める原理とアルゴリズムを説明する。尚、脚ZMPに関する影響については、後述する。また、実際には、倒立振子ZMPは、2次元空間（水平面上）を移動するが、以下の議論では、理解の容易のため、1次元空間を移動するものとする。

倒立振子のZMP（ZMPpend）波形として第10図に示すような折れ線を想定する。区間 i は、期間（時間）が $period[i]$ でその区間の初期値が $ZMP[i]$ であるとする。このZMPによって発生する発散成分を求めるための原理とアルゴリズムを説明する。

倒立振子モデルに倒立振子ZMP入力として、 $x=f(t)$ が時刻範囲 $[0, T]$ の間入力されたことによって発生する発散成分を、時刻0にされ、時間幅が刻み時間 Δt のパルスの大きさに換算したものを $H(f(t), T)$ とする。

数式16から、 $H(f(t), T)$ は、次の数式18に示す積和演算で表わされる（ ω ：倒立振子の固有角周波数）。

$$H(f(t), T) = \sum_{k=0}^{T/\Delta t - 1} (k\Delta t) \exp(-\omega k\Delta t) \quad \dots \text{数18}$$

ところで一般的に、区間 i の倒立振子ZMP波形は、第11図に示すように、ある遅れを持つステップ波形とランプ波形とに分解できる。そこで、まずステップ状の波形とランプ状の波形に対する $H(f(t), T)$ を以下に述べる手順で求めておく。

$x=f(t)=1$ のステップ波形の $H(f(t), T)$ を $H(1, T)$ と記述すると、等比級数の和の公式から、数式19に示すようになる。

$$H(1, T) = (1 - \exp(-\omega t)) / (1 - \exp(-\omega \Delta t)) \quad \dots \text{数19}$$

$x=f(t)=t$ のランプ波形の $H(f(t), T)$ を $H(t, T)$ と記述すると、数式 20 に示すようになる。

$$H(t, T)/T = (\Delta t/T * \exp(-\omega \Delta t) H(1, T) - \exp(-\omega t)) / (1 - \exp(-\omega \Delta t))$$

・・・数 20

尚、ZMP 波形が折れ線以外であるときは、上記以外の関数 f が必要となる。上記以外の関数 f では、解析解 $F(f(t), T)$ が存在しない場合もあるが、その際には、関数 f を正規化してから、 $H(f(t), T)$ をテーブル化すれば良い。尚、上記例でも $F(f(t), T)$ をテーブル化しても良い。

さて、ここまで準備しておいてから、第 10 図の倒立振子 ZMP によって発生する発散成分を、時刻 0 に入力されるパルスであって、その時間幅が刻み時間 Δt の倒立振子 ZMP パルスの大きさに換算したもの（以降、これを W と記す）を以下の手順で求める。

まず、区間 i ($i=0, 1, \dots, 5$) の倒立振子 ZMP の影響を、区間 i の初期時刻に入力されるパルスであって、その時間幅が刻み時間 Δt のパルスの大きさ $\text{inf}[i]$ に換算する。区間 i の倒立振子 ZMP 波形は、第 11 図に示すように、高さが $\text{ZMP}[i]$ の矩形波と傾きが $(\text{ZMP}[i+1] - \text{ZMP}[i]) / \text{period}[i]$ のランプ波の和で表わされるので、パルス換算値は数式 21 に示すようになる。

$$\text{inf}[i] = H(1, \text{period}[i]) * \text{ZMP}[i] + H(t, \text{period}[i]) / \text{period}[i] * (\text{ZMP}[i+1] - \text{ZMP}[i])$$

・・・数 21

次いで、区間 $\text{period}[i]$ ($i=0, 1, \dots, m$) の倒立振子 ZMP の影響を、時刻 0 に入力されるパルスであって、その時間幅が刻み時間 Δt のパルスの大きさ $\text{inf}'[i]$ に換算する。性質 3 から、パルス換算値は数式 22 のように算出される。

$$\text{inf}'[i] = \text{inf}[i] * \exp(-\omega 0 (\sum_{k=0}^{i-1} \text{period}[k]))$$

・・・数 22

第 10 図に示す倒立振子 ZMP 波形全区間の影響は、各区間の倒立振子 ZMP の影響の和になる。即ち、パルス換算値 W は、数式 23 に示すように算出される

$$W = \sum_{i=0}^m \inf'[i]$$

・・・数 2 3

さらに、性質 2 より、上記 W を初期発散成分に等価換算したものは、以下の数式 2 4 に示す値になる。

$$W * (\exp(-\omega_0 \Delta t) - 1)$$

・・・数 2 4

さらに、数式 2 4 または性質 3 より、これを歩容終端時刻での発散成分に換算したものは、数式 2 5 に示す値になる。

$$W * (\exp(-\omega_0 \Delta t) - 1) * \exp(\omega_0 (\sum_{i=0}^m \text{period}[i]))$$

・・・数 2 5

以上の手順により、折れ線の倒立振子 ZMP によって発生する歩容終端発散成分を解析的に求めることができる。

次いで、歩行の継続性を保証する歩容生成アルゴリズムについて述べる。

先に、上体軌道の発散を防止し、上体と両足平の間の適切な位置関係を継続させるためには、発散成分を歩行に支障ない範囲（姿勢が大きく崩れない範囲）から越えないように、ZMP 軌道パラメータなどを適切に決定することが重要であると述べた。次の問題は、歩行に支障ない発散成分の範囲あるいは適切な発散成分の値を如何に求めるかである。

この実施の形態に係る歩容生成部 100 は、今回生成する歩容につながるべき歩容（以下「定常旋回歩容」と呼ぶ。これについては後述する）を仮に想定することによって、適切な発散成分の値を決定するようにした。以下に歩容生成部 100 の動作を詳細に説明する。

歩容生成部は、2 歩先までの遊脚足平着地位置姿勢、着地時刻の要求値（要求）を入力として、目標上体位置姿勢軌道、目標足平位置姿勢軌道、目標 ZMP 軌

道を決定する。このとき、歩容パラメータの一部は、歩行の継続性を満足するように修正される。生成しようとしている歩容を「今回歩容」、その次の歩容を「次回歩容」、さらにその次の歩容を「次次回歩容」と呼ぶ。

第12図は、その歩容生成部100の歩容生成処理を示すフロー・チャート（構造化フロー・チャート）である。

以下説明すると、まずS10において時刻 t を0に初期化するなど種々の初期化作業を行う。次いでS12を経てS14に進み、制御周期毎のタイマ割り込みを待つ。制御周期は Δt である。次いでS16に進み、歩容切り変わり目であるか否かを判断し、肯定されるときはS18に進むと共に、否定されるときはS20に進む。

S18に進むときは時刻 t を0に初期化し、次いでS22に進み、次回歩容支持脚座標系、次次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期および次回歩容周期を読み込む。これらは前記した要求に相当するが、あらかじめ歩行スケジュールとして記憶しておいても良く、あるいはジョイスティック44などの操縦装置からの指令（要求）とそのときまでの歩行履歴を基に決定しても良い。

次いで、S24に進み、今回歩容の歩容パラメータを仮決定（仮に算出）する。

今回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、今回支持脚座標系から見た現在遊脚位置姿勢にする（初期値とする）。今回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、今回支持脚座標系から見た現在支持脚位置姿勢にする（初期値とする）。今回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回支持脚座標系から見た次回支持脚座標系に対応して決定する。（即ち、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢から足平を床に接触させたまま、すべらないように足平を水平まで回転させたときの位置姿勢が、次回支持脚座標系となるように設定する。）

今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、現在支持脚位置姿勢から足平を床に接触させたまま、すべらないように足平を床に面接触するまで回転させたときの位置姿勢とする。したがって、床が平面であるならば、今回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回支持脚座標系に一致する。尚、この歩容では、歩容終端において支持脚足平は水平になるが、必ずしも、このように設定する必要はない。

今回歩容のZMP軌道パラメータは、安定余裕が高く、かつ急激な変化をしないように決定する。（接地面を含む最小の凸多角形（いわゆる支持多角形）の中央付近にZMPが存在する状態を安定余裕が高いと言う（詳細は特開平10-86081号公報に記述））。ただし、今回歩容のZMP軌道パラメータは、仮決定されただけであり、後述するように修正される。

次いでS26に進み、今回歩容につながる定常旋回歩容の歩容パラメータを決定する。

尚、この明細書で「定常旋回歩容」は、その歩容を繰り返したときに歩容の境界において運動状態に不連続が生じないような周期的歩容を意味するものとして使用する。

定常旋回歩容は、通常、第1旋回歩容と第2旋回歩容とからなる。尚、ここで「旋回」なる用語を用いたのは、旋回率を零とするときは直進を意味するので、直進も広義の意味で旋回に含ませることができるからである。定常旋回歩容は、歩容生成部100で今回歩容の終端における発散成分を決定するために暫定的に作成されるものであり、歩容生成部100からそのまま出力されるものではない。

補足すると、定常旋回歩容は、狭義の意味での歩容（両脚支持期の初めから次の片脚支持期の終わりまでを1歩とする歩容）が、少なくとも2歩必要である。3歩以上の歩容からなる複雑な定常旋回歩容を設定することも可能であるが、今回歩容の終端における発散成分を決定するだけに用いられるので、処理が煩雑となるにも関わらず、効果は少ない。尚、8足以上の脚式移動ロボットにあっては、それに応じて旋回を定義するに足る歩容数が増加する。

先ず、今回歩容、第1旋回歩容、第2旋回歩容の順に脚軌道がつながるように、第1旋回歩容と第2旋回歩容の歩容パラメータ中の脚軌道の境界条件を設定する。

具体的には、第1旋回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢とする。第1旋回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系から見た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢とする。

第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回歩容終端遊脚足平位置姿勢の決定手法と同様に、次回歩容支持脚座標系から見た次次回歩容支持脚座標系に対応して決定する。第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、次回歩容支持脚座標系に一致させた足平を床に接触させたまま、すべらないように足平を床に面接触するまで回転させたときの位置姿勢とする。（したがって、床が平面であるならば、第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、次回支持脚座標系に一致する。）

第2巡回歩容初期遊脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢にする。第2巡回歩容初期支持脚足平位置姿勢は、次次回歩容支持脚座標系から見た第1巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢にする。

第2巡回歩容終端遊脚足平位置姿勢は、今回支持脚座標系から見た今回歩容終端遊脚足平位置姿勢にする。第2巡回歩容終端支持脚足平位置姿勢は、今回支持脚座標系から見た今回歩容終端支持脚足平位置姿勢にする。

これらの関係を第18図に示す。

第1巡回歩容および第2巡回歩容の歩行周期は、次回歩容周期と同一にする（尚、同一にすることは必ずしも必要ではないが、次回歩容周期に応じて決定するのが好ましい）。今回歩容、第1巡回歩容および第2巡回歩容の上記以外の運動パラメータ（両脚支持期時間などの時間パラメータを含む）は、上記決定されたパラメータに応じて、歩容の条件（電動モータ（アクチュエータ）の速度が許容範囲に入っていることなど）を満足するように適宜決定する。

第1巡回歩容および第2巡回歩容のZMP軌道パラメータも、安定余裕が高くかつ急激な変化をしないように決定する。

ところで、上体代表点の初期位置と速度をある値 X_0 , V_0 に設定すると、第5図に示す単純モデルを用いて上記第1巡回歩容と第2巡回歩容を生成し、再び第1巡回歩容の生成を開始するときの初期上体代表点位置速度が、前記設定した初期上体代表点位置速度の値 X_0 , V_0 に一致する。この値 X_0 , V_0 を「定常巡回歩容の初期上体代表点位置速度」と呼ぶ。この関係を図に表すと、第14図のようになる。ただし、 X_0 を (x_0, y_0) と表すこととし、 V_0 については表記は省略した。

このように設定すると、第5図に示す単純モデルを用いて第1旋回歩容と第2旋回歩容を交互に繰り返して生成しても、演算誤差が蓄積しない限り、第1旋回歩容の初期上体代表点位置速度は、値 X_0 、 V_0 になる。即ち、歩行の継続性が保証される。このときの発散成分、即ち、 $X_0 + V_0/\omega_0$ を、「定常旋回歩容の初期発散成分」と呼ぶ。

第12図の説明に戻ると、次いでS28に進み、定常旋回歩容の初期発散成分を求める。

第15図は、第12図フロー・チャートのS28の定常旋回歩容の初期発散成分を算出するサブルーチン・フロー・チャートである。

ここで、同図の説明に入る前に、定常旋回歩容の初期発散成分の算出原理を説明する。

数式3と数式7から、次の数式26が得られる。尚、目標ZMPを ZMP_{total} と記述する。

$$\begin{aligned}
 q[k] = & \exp(\omega_0 k \Delta t) * Q[0] \\
 & + \exp(\omega_0 k \Delta t) * (-\exp(\omega_0 \Delta t) - 1) \sum_{i=0}^{k-1} \exp(-\omega_0 \Delta t) * M_{total}/m_b * ZMP_{total}[i] \\
 & - \exp(\omega_0 k \Delta t) * (-\exp(\omega_0 \Delta t) - 1) \sum_{i=0}^{k-1} \exp(-i \omega_0 \Delta t) * m_{feet}/m_b * ZMP_{feet}[i]
 \end{aligned}
 \quad \dots \text{数 26}$$

実際には、各歩容はその歩容の支持脚座標系上で表現されるが、ここでは、説明を容易にするために、第1旋回歩容と第2旋回歩容は、第1旋回歩容の支持脚座標系で表現されているものとし、前記したように第1旋回歩容と第2旋回歩容を合わせて一つの歩容（定常旋回歩容）とみなす。

数式26を用いて、定常歩旋回容の終端における発散成分 $q[k]$ （これを以降、「終端発散成分」と呼ぶ）を求めることを考える。時刻0は、定常旋回歩容の初期時刻とする。定常旋回歩容の終端時刻は $k \Delta t$ とする。尚、終端時刻は、その次の歩容の時刻0に対応する。

右辺第1項は、初期発散成分によって発生する終端発散成分を表わす。右辺第2項は、目標ZMPパターンによって発生する終端発散成分を表わす。右辺第3

項は、脚運動によって発生する終端発散成分を表わす。

まず、目標ZMPパターンによって発生する終端発散成分は、目標ZMPパターンが折れ線であるので、前述の折れ線状ZMP_{pend}によって発生する終端発散成分を求める、数式19, 20, 21, 22, 23, 25に示すアルゴリズムを用いて解析的に求める。これをW_{zmptotal}とする。(XY方向があるので、W_{zmptotal}は2次元ベクトルになる。)

次に、脚運動によって発生する終端発散成分を求める。最も単純な求め方は、歩容生成部において内部的に、上記した定常旋回歩容の歩容パラメータから脚運動を生成し、さらにZMP_{feet}[i](i=0,1,...,k)を、数式1, 2から求め、これを、数式26の右辺第3項に代入する手法である。

演算量が多いが、ロボット1に搭載可能な高速のコンピュータを用いれば制御周期内に演算を完了することができる。また、コンピュータの性能を同一とするときも、演算に際してサンプリング周期を実際の制御周期よりも長く設定すれば、若干の誤差は発生するが、演算量を減少させることもできる。

上記の如くして求められた値をW_{feet}とする。(XY方向があるので、W_{feet}は2次元ベクトルになる。)

以上より、次の数式27を得る。

$$q[k] = \exp(\omega_0 k \Delta t) * q[0] + W_{zmptotal} + W_{feet}$$

... 数27

さて、定常発散成分の定義から、定常旋回歩容の次の歩容の支持脚座標系から見た定常旋回終端発散成分をq'[k]とすると、次の数式28を満足しなければならない。

$$q[0] = q'[k]$$

... 数28

一方、定常旋回歩容の支持脚座標系(第13図に示すX', Y'座標系)から見た定常旋回歩容の次の歩容の支持脚座標系(同図に示すX'', Y''座標系)を、座標系の回転を表わす回転行列Mと座標系の原点座標を表わす平行移動ベクト

ルBで表わすと、以下の数29に示すようになる。

$$q[k] = Mq'[k] + B$$

・・・数29

数式28と数式29より、次の数式30を得る。

$$q[k] = Mq[0] + B$$

・・・数30

さらに、数式30と数式27より、次の数式31を得る。

$$Mq[0] + B = \exp(\omega_0 k \Delta t) * q[0] + W_{zmp\text{total}} + W_{feet}$$

・・・数31

マトリックスAの逆行列を $\text{inv}(A)$ と記述すると、数式31から数式32が得られる。ただし、Iは単位行列である。

$$q[0] = \text{inv}(M - \exp(\omega_0 k \Delta t)I)(W_{zmp\text{total}} + W_{feet} - B)$$

・・・数32

上記した算出原理を前提とし、第15図フロー・チャートを参照して説明すると、S100において目標ZMPによって発生する終端発散成分を上記手法で求め、次いでS102に進み、数式26の右辺第3項を用いて脚反力によって発生する終端発散成分を求め、次いでS104に進み、数式32を用いて定常旋回初期発散成分 $q[0]$ を求める。定常旋回初期発散成分 $q[0]$ は、定常旋回歩容の支持脚座標系から見た値になっている。

次いで、S106に進み、定常旋回初期発散成分 $q[0]$ を今回歩容の支持脚座標系から見た値に変換する。これを q'' とする。

次の課題は、今回歩容の終端発散成分が q'' に一致するように、上記仮決定した今回歩容のパラメータを修正することである。この処理においては、上記定常旋回歩容における処理とほとんど同じであるので、以下では、変数、値、および記号を、改めて今回歩容に対応させる。

この実施の形態では、ZMP軌道パラメータを修正することとする。その他の歩容パラメータを修正しても良いが、通常、パラメータの修正量と終端発散成分の関係が非線形になるので、解析的に修正量を決定することはできない。

前記した仮決定された目標ZMP（これを「仮目標ZMP」と呼ぶ）に、ZMP修正量（補正量あるいは付加量）を加えることにより、ZMPを修正する。修正されたZMPを改めて目標ZMPという。これらの関係を第18図に示す。

同図に示す如く、目標ZMP（ZMPtotal）＝仮目標ZMP＋ZMP修正量、となるように、目標ZMPパラメータを修正する。

以降は、説明を簡単にするために、すべての変数を1次元の世界で扱う。

ZMP修正量は第18図中段に示すように台形状であり、その高さをaとする。目標ZMPパターンによって発生する終端発散成分Wzmptotalは、目標ZMPと終端発散成分の関係が線形であることから、以下の数式33に示すように表すことができる。

$$Wzmptotal = Wzmptmp + a * Wtrim$$

・・・数33

ここで、Wzmptmpは、今回歩容の仮目標ZMPパターンによって発生する終端発散成分である。Wtrimは、a＝1とした場合のZMP修正量によって発生する終端発散成分である。これらは、前記定常旋回歩容の目標ZMPパターンによって発生する終端発散成分を求める方法によって、解析的に求められる。

終端発散成分p[k]がp"であること、および、数式27と数式33より、次の数式34を得る。

$$q'' = \exp(\omega_0 k \Delta t) * q[0] + Wzmptmp + a * Wtrim + Wfeet$$

・・・数34

ただし、q[0]は、今回歩容の初期発散成分（初期倒立振子位置＋（初期倒立振子速度／ ω_0 ））である。したがって、次の数式35に示すようになる。

$$a = (q'' - \exp(\omega_0 k \Delta t) * q[0] - Wzmptmp - Wfeet) / Wtrim$$

・・・数35

最後に、ZMP修正量を仮目標ZMPに加算したものが目標ZMPとなるように、目標ZMPのパラメータを修正すれば、今回歩容の終端発散成分が、定常旋回歩容の初期発散成分を今回歩容から見た値 q'' に一致する。

第12図フロー・チャートの説明に戻ると、次いでS30に進み、今回歩容を修正する。具体的には、今回歩容の終端発散成分が定常旋回歩容の初期発散成分 q'' に一致するように、今回歩容のパラメータを修正する。

第17図はその処理を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

以下説明すると、S200において今回歩容の仮目標ZMPパターンによって発生する終端発散成分 W_{zmptmp} を求め、次いでS202に進み、 $a=1$ とした場合のZMP修正量によって発生する終端発散成分 W_{trim} を求める。

次いでS204に進み、今回歩容の脚運動によって発生する終端発散成分たる W_{feet} を求め、次いでS206に進み、今回歩容の初期発散成分 $q[0]$ を初期倒立振子位置と速度から求め、求めた値を数式35に代入してZMP補正量の台形高さ a を求める。次いでS208に進み、前記したように目標ZMPのパラメータを修正する。

以上が、歩容の切り変わり目の処理である。

第12図フロー・チャートの説明に戻ると、次いでS20に進み、決定された歩容パラメータから今回歩容の瞬時値を決定する。

第18図はその処理を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

以下説明すると、S300において、今回歩容パラメータを基に、時刻 t における目標ZMPを求め、S302に進み、今回歩容パラメータを基に、時刻 t における目標両足平位置姿勢を求める。

次いでS304に進み、今回歩容パラメータを基に、時刻 t における目標上体姿勢を求め、S306に進み、数式1および数式2を用いて、時刻 t およびそれ以前の目標足平位置姿勢から、時刻 t における脚ZMP (ZMP_{feet}) を算出する。

次いでS308に進み、数式3を用いて、倒立振子ZMP (ZMP_{pend}) を算出し、S310に進み、数式4を用いて、倒立振子ZMPから倒立振子水平位置を算出する。次いでS312に進み、倒立振子水平位置から上体の水平位置を決定す

る。具体的には、前述したように、上体代表点の水平位置が、倒立振子質点水平位置に一致するように決定する。

次いでS 3 1 4に進み、本出願人が先に特開平 1 0 - 8 6 0 8 0 号公報で提案した上体高さ決定手法を用いて上体高さを決定する。

第 1 2 図フロー・チャートの説明に戻ると、次いでS 3 2に進み、時刻 t に Δt を加え、再びS 1 4に戻り、上記の処理を繰り返す。

第 4 図を参照してこの実施の形態に係る歩容生成装置の動作をさらに説明すると、歩容生成部 1 0 0 において、上記したように目標歩容が生成される。生成された目標歩容の歩容パラメータの中、目標上体位置姿勢（軌道）は、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部） 1 0 2 に直接送られる。

また、その他の目標足平（足部）位置姿勢（軌道）、目標全床反力中心点（即ち、目標ZMP）軌道、および目標全床反力（軌道）は、複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に直接送られる一方、目標床反力分配器 1 0 6 にも送られ、そこで床反力は各足平（足部 2 2 R, L）に分配され、目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力が決定されて複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られる。

複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 から、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）がロボット幾何学モデル 1 0 2 に送られる。ロボット幾何学モデル 1 0 2 は、目標上体位置姿勢（軌道）と機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を入力されると、それらを満足する 1 2 個の関節（1 0 R（L）など）の関節変位指令（値）を算出して変位コントローラ 1 0 8 に送る。変位コントローラ 1 0 8 は、ロボット幾何学モデル 1 0 2 で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット 1 の 1 2 個の関節の変位を追従制御する。

よってロボット 1 に生じた床反力は実各足床反力平検出器 1 1 0（6軸力センサ 3 4）によって検出される。検出値は前記した複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られる。また、ロボット 1 に生じた姿勢傾斜偏差 θ_{errx} 、 θ_{erry} は傾斜センサ 3 6 によって検出され、検出値は姿勢安定化制御演算部 1 1 2 に送られ、そこで姿勢傾斜を復元する目標全床反力中心点まわり補償全床反力モーメントが算出されて複合コンプライアンス動作決定部 1 0 4 に送られる。複合コンプ

ライアンス動作決定部 104 は、入力値に基づいて目標値を修正する。

尚、この発明の要旨は歩容生成部 100 におけるロボットの歩容生成にあり、上記した複合コンプライアンス動作決定部 104 などの構成および動作は、本出願人が先に出願した特開平 10-277969 号公報などに詳細に記載されているので、説明を以上に止める。

この実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置は上記の如く構成したので、本出願人が先に特開平 10-88081 号において提案した技術の上記した不都合を解消し、脚式移動ロボットの床反力を含む歩容を、動力学平衡条件をほぼ満足しながら、自在かつリアルタイムに生成して任意の歩幅、旋回角、歩行周期などの歩容を生成することができると共に、生成された歩容同士の境界においてロボットの各部位の変位および速度が連続な歩容を生成することができる。

即ち、第 19 図は上体代表点の Y 軸方向（左右方向）の軌道を示すタイム・チャートであるが、この実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置にあっては、同図に符合 B で示すように、上体代表点の軌道が定常旋回歩容の上体代表点の軌道 A に漸近（収束）するような歩容を生成することができる。

さらに、脚式移動ロボットの動力学モデルを単純化して線形度を高めたので、発散などのロボットの将来の挙動を予測して歩容を生成することができる。

また、それによって歩行以外の動作もリアルタイムに生成できるようになるので、歩行以外の任意の動作と歩行を連続的に滑らかにつなげることも可能となる。

尚、上記で留意されるべきことは、上記した実施の形態において、第 5 図に示す 3 質点モデルは、必須ではないことである。即ち、第 5 図に示す 3 質点モデルに代え、例えば特公平 4-15068 号公報で提案される 1 質点モデルを使用しても良い。その場合は、上記した実施の形態において脚質量を 0 にしたことと等価となる。近似精度は低下するが、脚運動によって発生する発散成分が 0 となることから、演算量を低減することができる。

第 20 図は、この発明の第 2 の実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置の動作の一部を示す、第 1 の実施の形態の第 15 図に類似する、定常旋回歩

容の初期発散成分の算出作業のサブルーチン・フロー・チャートである。

上で3質点モデルに代えて1質点モデルを使用することも可能と述べたが、第2の実施の形態にあっては、搭載するCPU（第1の演算装置60）の能力が格段に高いことを前提とし、3質点モデルに代え、第28図に示したような全リンクに質点を設定した、換言すれば非線形なモデルを用いて歩容を生成するようにした。

第2の実施の形態に係る装置の動作を説明すると、第1の実施の形態の第12図においてS10からS26までに示すのと同様の処理を行ってS28に進んだ後、そのサブルーチン・フロー・チャートである第20図に進み、定常旋回歩容の初期発散成分を算出する。

第20図フロー・チャートにおいては、先ずS400において初期上体位置速度候補（ X_0 , V_0 ）を仮決めする。上体位置速度は、上体代表点の位置と速度を意味する。尚、説明を簡略にするため、X方向だけを探索する場合を例にとるが、実際には位置速度ともX, Y方向を別々にあるいは同時に探索する必要がある。X, Y方向を同時に探索するときは、探索空間がX位置、Y位置、X速度、Y速度の4次元になる。

次いでS402を経てS404に進み、動力学モデル（第23図に示したような全リンクに質点を設定した非線形なモデル）を用いて（ X_0 , Y_0 ）を上体の初期状態として定常旋回歩容パラメータを基に、時刻0から終端時刻までの歩容を生成する。

具体的には、目標ZMPと目標足平位置姿勢と目標上体姿勢を求め、（ X_0 , V_0 ）を上体の初期位置速度とし、動力学モデルを用いて目標ZMPを満足する上体軌道を生成する。第1の実施の形態と同様に、軌道生成は歩容生成部100の内部で行われるだけであって、出力されることはない。

次いでS406に進み、生成した歩容の終端上体位置速度を次ぎの1歩の支持脚座標系（第14図の X' , Y' 座標系と同様）から見た値に変換し、その値を（ X_e , V_e ）とする。

次いでS408に進み、図示の如く、（ X_0 , V_0 ）と（ X_e , V_e ）の差（ err_x , err_y ）を算出する。即ち、定常旋回歩容では（ X_0 , V_0 ）と（ X_e , V_e ）

e) が一致していなければならないことから、両者の差 (err_x, err_y) が 0 となるように探索することを考える。

次いで S 4 1 0 に進み、算出した差が、適宜設定する許容範囲内にあるか否か判断する。尚、このように位置と速度の境界条件ずれの許容値を設定する代わりに、初期発散成分 ($X_0 + V_0 / \omega_0$) と初期収束成分 ($X_0 - V_0 / \omega_0$) が、それぞれある許容範囲内にあるか否か判断するようにしても良い。

S 4 1 0 で否定されるときは S 4 1 2 に進み、(X_0, V_0) の付近に複数の初期値候補 ($X_0 + \Delta X_0, V_0$), ($X_0, V_0 + \Delta V_0$) を決め、それぞれを上体の初期状態として定常旋回歩容の歩容パラメータを基に歩容を生成し、生成した歩容の終端上体位置速度を次ぎの 1 歩の支持脚座標系から見た値に変換した値 ($X_e + \Delta X_{e1}, V_e + \Delta V_{e1}$), ($X_e + \Delta X_{e2}, V_e + \Delta V_{e2}$) を求める。

次いで S 4 1 4 に進み、(X_0, V_0) およびその付近の初期値候補に対する終端上体位置速度と前記した差を基に、次ぎの初期値候補 (X_0, V_0) を決定する。

S 4 1 0 で否定される限りは上記した処理を繰り返すと共に、肯定されるときは繰り返しループ (S 4 0 2) を抜けて S 4 1 6 に進み、定常旋回初期発散成分 $q[0]$ を図示の式から求める。次いで S 4 1 8 に進み、第 1 の実施の形態の第 1 5 図の S 1 0 6 と同様な処理を行う。

尚、第 1 の実施の形態で用いたような線形な 3 質点モデルを用いていないが、発散成分および収束成分の概念は、第 2 3 図に示すような非線形なモデルの挙動の摂動分に対しても近似的に十分な精度で適用することができるので、第 1 の実施の形態と同様な式を用いて発散成分を定義することとする。

次いで第 1 2 図と同様のフロー・チャートにおいて S 3 0 に進み、今回歩容の歩容パラメータを修正する。

第 2 1 図はその処理を示すサブルーチン・フロー・チャートである。

以下説明すると、S 5 0 0 を経て S 5 0 2 に進み、仮目標 ZMP パターンとその他の今回歩容の歩容パラメータを基に、終端時刻までの今回歩容を計算することによって今回歩容終端での上体位置速度 (X_e, V_e) を求め、さらに終端発

散成分 $q[0]$ を図示の式を用いて求める。

次いで S 5 0 4 に進み、終端発散成分誤差 $errq$ を図示の式を用いて求め、S 5 0 6 に進んで求めた誤差が許容範囲内にあるか否か判断し、否定されるときは S 5 0 8 に進み、 $a = \Delta a$ とし、第 1 の実施の形態と同様に第 1 6 図の関係に従って仮目標 ZMP パターンに修正を加えた目標 ZMP を基に、終端時刻までの今回歩容を計算することによって、今回歩容終端での上体位置速度 (X_e , V_e) を求め、さらには終端発散成分 $q_1[k]$ を図示の式を用いて求める。

尚、S 5 0 8 において Δa は適宜に設定される微小量の定数である。繰り返し演算によって誤差 $errq$ が小さくなるにつれて Δa も減少するように設定しても良い。ただし、定数としても、数回の繰り返し演算で誤差は許容範囲内になる。

次いで S 5 1 0 に進み、パラメータ感度 r を図示の式から求め、S 5 1 2 に進み、図示のように求めた修正量を仮目標 ZMP パターンに加え、仮目標 ZMP パターンを修正する。

S 5 0 6 で否定される限りは上記した処理を繰り返すと共に、肯定されるときは繰り返しループ (S 5 0 0) を抜けて S 5 1 4 に進み、最終的に得られた仮目標 ZMP パターンの値を目標 ZMP と決定する。

上記を説明すると、動力学モデルを用いて今回歩容パラメータに従って歩容を生成し、そのまま連続して定常旋回歩容パラメータに従って歩容を繰り返し生成したとき、生成した歩容が定常旋回歩容に収束するためには、第 1 の実施の形態と同様に、今回歩容の終端発散成分が、定常旋回初期発散成分 $q[0]$ を今回歩容の支持脚座標系から見た値である q^* に、完全にあるいはほぼ一致していなければならない。

そこで、第 2 の実施の形態においても、その条件を満足するように、今回歩容の歩容パラメータの中の目標 ZMP パターンを修正するようにした。

尚、第 2 の実施の形態にあっても、定常旋回歩容との境界における上体位置速度が一致するように今回歩容パラメータを修正しても良い。ただし、発散成分に関する境界条件だけを満足する場合に比較すると、条件が厳しくなり、修正すべきパラメータを 2 倍に増やすこととなって探索空間が増大する。

また、上記したように、目標 ZMP を修正して上体位置速度を一致させる場合

には、ZMP修正量の波形も、第16図に示すような単純な台形形状に止まらず、2段式の台形形状のような複雑な形状としなければならない、修正量も大きくなりがちである。

第19図を再び参照して説明すると、前述したように、同図に符合Aで示す軌道は、定常旋回歩容との境界における上体代表点の位置速度が一致するように今回歩容を生成し、次いで定常旋回歩容を生成した場合の上体代表点軌道を指す。符号Bで示す軌道は、今回歩容の終端発散成分が q'' に一致するように今回歩容を生成し、次いで定常旋回歩容パラメータを用いて連続する歩容を生成し続けた場合の上体代表点軌道を示す。

図示の如く、符合Bで示す軌道は、今回歩容と最初の定常旋回歩容との境界においては、通常、符号Aで示す軌道からずれているが、その後、徐々に符号Aで示す軌道に収束（漸近）し、次ぎの定常旋回歩容時期で符号Aで示す軌道にほぼ一致する。このように、発散成分のみを一致させる歩容生成手法でも、位置速度までも一致させる歩容生成手法と同様、歩容の発散を防止する効果を得ることができる。

同図に符合Cで示す例は、それらを考慮せずに軌道を生成した場合を示す。このような場合は、生成した軌道は経時的に符合Aで示す軌道から発散してしまう。尚、位置速度までも一致させる歩容生成手法は、換言すれば、発散成分のみならず、収束成分も一致させる歩容生成手法である。したがって、位置速度までも一致させる歩容生成手法は、発散成分のみを一致させる歩容生成手法の特殊例であると言えることができる。

尚、目標ZMP以外のパラメータを修正しても良い（これは第1の実施の形態でも同様である）。また、説明を簡略化するために、X方向だけの1次元探索としたが、実際には、定常旋回歩容の上体位置速度の初期値探索と同様に次元が増加する。

尚、第2の実施の形態においては、疑似的なニュートン法（あるいは (X_0, V_0) での疑似的なヤコビアン（感度マトリックス）を求めて次ぎの候補を決定する手法）を用いるようにしたが、シンプレックス法などの探索法を用いても良い。さらには、予め種々のパラメータに対して探索計算を行ってマップ化してお

いても良い。

さらに、第2の実施の形態で述べた非線形モデルを用いて探索的に歩容を求める手法は、第1の実施の形態の解析的に歩容を求めるのに使用した3質点モデル（あるいは1質点モデル）などの線形モデルを用いても良いことは言うまでもない。ただし、解析的に歩容を求めることができるので、非効率な探索法を用いることの意義は少ない。その他、実質的に十分な精度があるならば、どのような動力学モデルを用いても良い。

第1の実施の形態あるいは第2の実施の形態において、想定した定常旋回歩容通りに歩容を生成し続けているときには、ZMP修正量が0となり、今回歩容として決定される目標ZMPは、想定した定常旋回歩容のZMP（仮目標ZMP）と一致する。ところで、定常旋回歩容のZMP（仮目標ZMP）は通常、安定余裕が高くなるように設定される。したがって、想定した定常旋回歩容通りに歩容を生成し続けている場合には、今回歩容の安定余裕も高い。

それに対し、今回歩容を1歩前に想定した定常旋回歩容と大きく異なるように生成しようとする、ZMP修正量の絶対値が大きくなるので、今回歩容として決定される目標ZMP軌道は理想的な軌道から大きくずれ、安定余裕が低くなる。例えば、右に旋回しようとするときは右に重心をずらすように歩容が生成されるが、その次の1歩で急に左旋回するような要求が生じた場合、重心を右から左に移動させるために目標ZMP軌道を大きく右にずらす必要が生じ、安定余裕が低下して右に倒れやすくなる。

以上の性質から、想定した定常旋回歩容は、将来実際に生成されるであろう歩容になるべく近くなるように設定すべきである。

定常旋回歩容で歩き続けることは特殊なことであり、一般的には、定常旋回歩容からずれた歩容が将来生成されるが、上記における定常旋回歩容設定手法は、将来実際に生成されるであろう歩容になるべく近くなるように設定する例である。

上記以外の定常旋回歩容の設定手法を、以下の1)から4)までに示す。4)を除くと、将来実際に生成されるであろう歩容と定常旋回歩容のずれは、上記で得るよりも大きくなる傾向があるが、演算が容易になる。

1) 次次回支持脚座標系と次次回歩行周期は、今回支持脚座標系、今回歩行周期およびそれまでの歩行履歴を基に、生成したい歩容の移動速度や旋回速度が急激に変化しないであろうということを前提にして予想する、あるいは外挿的に求めしても良い。

2) 定常旋回歩容を常に直線歩容にしても良い。ただし、旋回速度が大きくなるにつれ、ZMP修正量が増加する。即ち、安定余裕が低下する。

3) 定常旋回歩容を常に静止歩容あるいはその場足踏み歩容にしても良い。ただし、歩行速度が上がるにつれ、ZMP修正量が増加する。尚、「静止歩容」とは、動きのない静止状態の歩容を意味する。

4) 今回歩容と定常旋回歩容の間に過渡期歩容を追加しても良い。挙動予測演算が複雑になるが、定常旋回歩容を決定するときの制約条件（境界条件）が緩くなり、より望みに近い定常旋回歩容が設定できるので、より一層安定余裕を高めることができる。

さらには、3)と4)を組み合わせることも可能であり、次いで述べるこの発明の第3の実施の形態に係る脚式移動ロボットの歩容生成装置は、その点に焦点をおいたものである。

第22図は、その第3の実施の形態に係る装置の動作の一部を示す、第1の実施の形態の第13図に類似する、定常旋回歩容の別の設定例を示す説明図である。

即ち、第22図に示す如く、定常旋回歩容が静止歩容を含むように構成すると共に、今回歩容と静止歩容（定常旋回歩容）の間に過渡的な歩容（過渡歩容。定常旋回歩容以外の歩容を意味する）を挿入するようにした。

このように、今回歩容、過渡歩容、静止歩容からなる3つの歩容を設定することによって、姿勢の発散を効果的に防止することができる。また、いつでも静止状態に移行できるように歩容が生成されるので、急に停止要求が与えられても、安定余裕の高い停止動作が可能となる。

具体的には、静止歩容も定常旋回歩容の1つと考え、前述の定常旋回歩容の初期発散成分算出アルゴリズムを使用することとする。ただし、静止時の上体質点速度が0であることから、発散成分は倒立振子質点位置に一致するので、わざわざ

ざこのアルゴリズムを用いなくとも容易に求めることができる。

第3の実施の形態は上記の如く構成したので、第1の実施の形態および第2の実施の形態の場合と同様に、安定余裕の高い歩容を自在かつリアルタイムに生成することができる。

第1の実施の形態から第3の実施の形態は上記の如く、少なくとも上体24と、前記上体に連結される複数本、より具体的には2本の脚部（脚部リンク）2を備えた脚式移動ロボット1の歩容生成装置（歩容生成部100）において、少なくとも前記上体と脚部の運動と、床反力、より具体的にはZMPとの関係を表す動力学モデル（第5図および第6図に示す）、少なくとも要求（次回歩容支持脚座標系、次次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期、次回歩容周期など。S22）に応じ、前記脚部の軌道（目標足平位置姿勢軌道）と前記床反力の軌道（目標全床反力中心点軌道（目標ZMP軌道））を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段（S24）、少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容（定常旋回歩容）の前記パラメータを想定（決定）する周期的歩容パラメータ想定手段（S26）、前記動力学モデルおよび前記今回歩容のパラメータとそれに続く前記周期的歩容のパラメータに基づいて決定される前記上体の軌道（目標上体位置姿勢軌道）が、前記周期的歩容のパラメータから決定される前記周期的歩容の前記上体の軌道に実質的に収束あるいは一致するように、少なくとも前記仮決定された今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段（S30、S200からS208）、および少なくとも前記修正された前記今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段（S20、S300からS314）を備えるように構成した。

また、少なくとも上体24と、前記上体に連結される複数本、具体的には2本の脚部（脚部リンク）2を備えた脚式移動ロボット1の歩容生成装置（歩容生成部100）において、少なくとも前記上体と脚部の運動と、床反力（具体的にはZMP）との関係を表す動力学モデル（第5図および第6図に示す）、少なくとも要求（S22）に応じ、前記脚部の軌道（目標足平位置姿勢軌道）と前記床反力の軌道（目標全床反力中心点軌道（目標ZMP軌道））を決定するパラメータ

を少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段（S 2 4）、少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容（定常旋回歩容）の前記パラメータを想定（決定）する周期的歩容パラメータ想定手段（S 2 6）、前記周期的歩容の前記パラメータに基づき、前記周期的歩容の前記上体の挙動を前記動力学モデルで近似したときの発散成分の歩容境界での値である、周期的歩容境界発散成分（定常旋回初期発散成分）を決定する周期的歩容境界発散成分決定手段（S 2 8, S 1 0 0 から S 1 0 6）、前記今回歩容のパラメータに基づき、前記動力学モデルを用いて生成される今回歩容の終端における少なくとも前記発散成分（終端発散成分）が完全に一致あるいは実質的に一致するように、前記今回歩容のパラメータ、より具体的には目標 ZMP のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段（S 3 0, S 2 0 0 から S 2 0 8）、および少なくとも前記修正された前記今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段（S 2 0, S 3 0 0 から S 3 1 4）を備える如く構成した。

また、前記今回歩容と前記周期的歩容の間に過渡的な歩容（過渡歩容）が挿入される如く構成した。

また、前記周期的歩容が静止歩容を含む如く構成した。

また、少なくとも上体 2 4 と、前記上体に連結される複数本、より具体的には 2 本の脚部（脚部リンク）2 を備えた脚式移動ロボット 1 の歩容生成装置（歩容生成部 1 0 0）において、前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力（総慣性力）である脚部反力、より具体的には脚 ZMP（ZMPfeet）を前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部反力算出手段（脚 ZMP 算出器 2 0 0, S 2 0, S 3 0 6）、少なくとも前記算出された脚部反力と目標床反力、より具体的には目標 ZMP とから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置（ZMPpend）を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段（S 2 0, S 3 0 8）、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位、より具体的には前記倒立振子質点位置（倒立振子水平位置 x_b ）を算出する倒立振子モデル変位算出手段（S 2 0, S 3 1 0）、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置、より具体

的には前記上体の水平位置を算出する上体位置算出手段（上体位置決定器 202, S20, S312, S314）、および少なくとも前記算出された上体位置を用いて歩容、より具体的には今回歩容の瞬時値を生成（算出）する歩容生成手段（S20, S300からS314、歩容生成部100）を備えるように構成した。

また、少なくとも上体24と、前記上体に連結される複数本、より具体的には2本の脚部（脚部リンク）2を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置（歩容生成部100）において、前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力に疑似的に対応する前記脚部のZMPに相当する脚部ZMP（ZMPpend）を前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部ZMP算出手段（脚ZMP算出器200, S20, S306）、少なくとも前記算出された脚部ZMPと目標ZMPとから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置（ZMPpend）を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段（S20, S308）、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位、より具体的には前記倒立振子質点位置（倒立振子水平位置xb）を算出する倒立振子モデル変位算出手段（S20, S310）、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段（S20, S312, S314。上体位置決定器202）、および少なくとも前記算出された上体位置を用いて歩容、より具体的には今回歩容の瞬時値を生成（算出）する歩容生成手段（S20, S300からS314、歩容生成部100）を備える如く構成した。

また、前記倒立振子モデル支点位置算出手段は、前記目標ZMPに第1の係数 m_{total}/m_b を乗じて得た積から、前記脚部ZMPに第2の係数 m_{feet}/m_{total} を乗じて得た積を減算して前記倒立振子モデルの支点位置（倒立振子水平位置xb）を算出する如く構成した。

また、少なくとも上体24と、前記上体に連結される複数本、より具体的には2本の脚部（脚部リンク）2を備えた脚式移動ロボット1の歩容生成装置（歩容生成部100）において、前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力である脚部反力（脚ZMP（ZMPfeet））を前記上体の挙動に依存せずに算出する脚

部反力算出手段（脚ZMP算出器200、S20、S306）と、少なくとも前記算出された脚部反力と目標床反力（目標ZMP）とから、少なくとも前記上体の動学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置（倒立振子ZMP（ZMPpend））を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段（S20、S308）と、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位、より具体的には位置（倒立振子水平位置）を算出する倒立振子モデル変位算出手段（S20、S310）と、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置（上体の水平位置）を算出する上体位置算出手段（上体位置決定器202、S20、S312、S314）とから構成される動力学モデル、少なくとも要求（S22）に応じ、前記脚部の軌道（目標足平位置姿勢軌道）と前記床反力の軌道（目標全床反力中心点軌道（目標ZMP軌道））を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段（S24）、少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容（定常旋回歩容）の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段（S26）、前記周期的歩容の前記パラメータに基づき、前記周期的歩容の境界における前記倒立振子モデルの発散成分である周期的歩容境界発散成分（定常旋回歩容の初期発散成分）を決定する周期的歩容境界発散成分決定手段（S28、S100からS106）、前記今回歩容のパラメータに基づき、前記動力学モデルを用いて生成される今回歩容の終端における前記倒立振子モデルの発散成分が前記周期的歩容境界発散成分（今回歩容の終端発散成分）に完全に一致または実質的に一致するように、前記今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段（S30、S200からS208）、および少なくとも前記修正された今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段（S20、S300からS314）を備える如く構成した。

また、前記床反力が少なくともZMPを含む如く構成した。前記（第5図および第6図に示す）倒立振子モデルが線形モデルである如く構成した。

次いで、脚ZMP（ZMPfeet）の算出について付言する。

脚ZMP（ZMPfeet）を求める関数は、以下の条件を満たすことが望ましい（第

1の実施の形態では、これら全ての条件を満足している)。

条件a) 足平軌道を決定する歩容パラメータの全てまたは一部を基に決定されること。

条件b) 上体代表点の運動の影響を受けないこと。

条件c) 単純化モデルの近似精度が十分に高いこと。

条件d) 可能な限り連続であること。(上体加速度を連続にするため。)

これらの内、条件a, bは予測演算を容易にするための条件である。上記では、数式1と数式2から脚ZMPを求めているが、数式1と続いて述べる数式36および数式37を用いても良い。

$$\text{点Pまわりの脚総慣性力モーメント} = m_{\text{feet}} * (ZMP_{\text{feet}} - x_p) * (G - C * a_{\text{feetz}})$$

・・・数36

ただし、Cは定数であり、また、両脚重心加速度ベクトル a_{feet} が数式37によって求められ、数式36の両脚重心鉛直方向加速度ベクトル a_{feetz} は、 a_{feet} のX, Y成分を0にしたベクトルである。

$$a_{\text{feet}} = (m_{\text{sup}} * d^2(x_{\text{sup}}) / dt^2 + m_{\text{swg}} * d^2(x_{\text{swg}}) / dt^2) / (m_{\text{sup}} + m_{\text{swg}})$$

・・・数37

数式36は、数式2よりも調整自由度が高いため、近似精度を高くすることができる。また、点Pまわりの脚総慣性力モーメントを求める数式1において、脚加速度に関する項を故意に定数倍するなど、力学的には正しくない式に変更しても、最終的に単純化モデルの近似精度が高くなるのであれば、差し支えない。

続いて、作用点Pの設定に関して付言する。

作用点Pは次のように設定することも可能である。

- 1) 今回歩容の支持脚座標系原点あるいはその近傍の所定の点に作用点Pを設定する。
- 2) 両脚支持期の間に直前歩容の支持脚座標系原点あるいは近傍の所定の点から今回歩容の支持脚座標系原点あるいは近傍の所定の点に、連続的に移動するように作用点Pを設定する。

3) 作用点Pを仮目標ZMP軌道に一致させる。

以下、それぞれの特徴を解説する。

1) については、作用点Pが脚位置に対して相対的に不連続（即ち、床に設定された絶対座標系から見て不連続）になるので、ZMPfeet も脚位置に対して相対的に不連続（即ち、前記した絶対座標系から見て不連続）になる欠点がある。しかしながら、両足平の加速度があまり大きくない両脚支持期に座標系を切り替える限り、不連続の大きさは、歩行上、あまり問題にならない。

2) については、近似精度は、1) よりも良い。また、作用点Pが脚位置に対して相対的に連続になるので、ZMPfeet も脚位置に対して相対的に連続になる。

3) については、2) の手法よりもさらに近似精度が高くなる。また2) と同様に、ZMPfeet も脚位置に対して相対的に連続になる。

続いて、脚総慣性力モーメントの算出について付言する。

各足平質点軌道は、足平運動パラメータから決定される軌道であるが、各足平質点軌道を求める際に用いる足平位置姿勢の軌道は、歩容生成部100から出力される目標歩容の足平位置姿勢と一致していなくても良い。

たとえば、目標歩容の足平が回転する場合であっても、各足平質点軌道を求める際に用いる足平位置姿勢の軌道は、足平を水平姿勢を保ったまま（即ち、べた足）であっても良い。精度が著しく低下しない限り、持ち上げ量等、他のパラメータを変えた軌道にしても良い。

また、脚質点は次のように設定しても良い。

1) 足平内の所定の点

2) 上記点から鉛直方向に一定距離ずらした点

3) 足平内に複数の質点を設定しても良い。また足平にイナーシャを設定しても良い。

上記いずれの手法も、前記条件b) を満足している。

上体および脚の質点オフセット設定について付言すると、上体および脚の質点オフセット設定値は、固定値でもほとんど問題ないが、重心位置のモデル化誤差をできるかぎり小さくするために、歩容パラメータに応じて補正されるようにしても良い。また、前記したような倒立振子の水平位置を上体代表点水平位置に対

応させる代わりに、ロボットの全重心位置あるいは一部の重心位置（脚部の全部あるいは一部の質量分布を除く、ロボットの質量分布の重心位置）に対応させても良い。

また、倒立振子の高さに関しては、歩容パラメータに応じて変更しても構わないが、将来挙動予測を容易にするために、短期的（例えば1歩の期間）には一定値にするのが望ましい。

さらに、脚反力によって発生する発散成分の算出について付言すると、脚反力によって発生する発散成分を、制御周期毎の脚軌道を生成せずに、歩容パラメータから近似的に直接求めるようにしても良い。

例えば、脚ZMPが、一歩の間、歩容初期の両脚重心位置と歩容終端での両脚重心位置の平均値にあると近似すれば、この平均値に $H(1, T)$ を乗じたものが、脚反力によって発生する発散成分を時刻0のインパルスに換算したものの近似値になる。

脚運動によって発生する終端発散成分は、歩容パラメータ（特に脚運動パラメータと時間パラメータ）を入力とする関数になっている。したがって、歩容パラメータと脚運動によって発生する終端発散成分の関係を表わすマップを作成しておけば、演算量を減らすこともできる。ただし、必要なメモリ容量が増加する。いずれの手法を用いても良い。

上記した変形例を組み合わせることも可能である。例えば、ZMP修正値を求めるための（将来挙動予測時の）脚ZMP算出手法と、今回制御周期の瞬時値を求めるときの脚ZMP算出法は厳密に一致していなくても良い。少し差があっても、ZMP修正値を求めるときに初期発散成分の影響が考慮されているので、前記差によって、発散成分がずれても、1歩後に再び歩容を設計するときに、発散しないように補正されるからである。

尚、上記した第1の実施の形態の第12図フロー・チャートにおいて $t=0$ のときに歩容を修正または変更したが（S10）、それ以外の時点で修正または変更しても良い。そのときは現在時刻を今回歩容の初期時刻とみなせば良い。即ち、今回歩容の期間が現在時刻から今回歩容終端時刻までであるとすれば良い。

尚、上記において、第6図に示したブロック線図は、演算処理順序を変えるな

どの等価変形をしても良い。

また、この発明を2足歩行ロボットに関して説明してきたが、3足以上の多脚ロボットにも応用することができる。

産業上の利用可能性

この発明によれば、例えば、上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデルを備え、要求に応じ、脚部の軌道などを決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定し、今回歩容に続く周期的歩容のパラメータを想定し、動力学モデルおよび今回歩容のパラメータとそれに続く周期的歩容のパラメータに基づいて決定される前記上体の軌道が、周期的歩容のパラメータから決定される上体の軌道に実質的に収束あるいは一致するように、少なくとも今回歩容のパラメータを修正し、修正今回歩容のパラメータに基づいて今回歩容の瞬時値を決定する如く構成したので、脚式移動ロボットの床反力を含む歩容を、動力学的平衡条件をほぼ満足しながら、自在かつリアルタイムに生成して、任意の歩幅、旋回角、歩行周期などの歩容を生成できるようにした脚式移動ロボットの歩容生成装置を提供することができる。

さらに、生成された歩容同士の境界においてロボットの各部位の変位および速度が連続で、かつ安定余裕の高い歩容を生成できると共に、ロボットの将来の挙動を予測して姿勢の発散などの不都合が生じないように歩容を生成することができる。さらに、高速演算を可能としてリアルタイムに歩容を生成することができる。

請求の範囲

1. 少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、
 - a. 少なくとも前記上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデル、
 - b. 少なくとも要求に応じ、前記脚部の軌道と前記床反力の軌道を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段、
 - c. 少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段、
 - d. 前記動力学モデルおよび前記今回歩容のパラメータとそれに続く前記周期的歩容のパラメータに基づいて決定される前記上体の軌道が、前記周期的歩容のパラメータから決定される前記周期的歩容の前記上体の軌道に実質的に収束あるいは一致するように、少なくとも前記仮決定された今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段、および
 - e. 少なくとも前記修正された前記今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段、を備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。
2. 少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、
 - a. 少なくとも前記上体と脚部の運動と、床反力との関係を表す動力学モデル、
 - b. 少なくとも要求に応じ、前記脚部の軌道と前記床反力の軌道を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段、
 - c. 少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段、
 - d. 前記周期的歩容の前記パラメータに基づき、前記周期的歩容の前記上体の挙動を前記動力学モデルで近似したときの発散成分の歩容境界での値である、

- 周期的歩容境界発散成分を決定する周期的歩容境界発散成分決定手段、
- e. 前記今回歩容のパラメータに基づき、前記動力学モデルを用いて生成される今回歩容の終端における少なくとも前記発散成分が一致あるいは実質的に一致するように、前記今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段、
- および
- f. 少なくとも前記修正された前記今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段、
- を備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。
3. 前記今回歩容と前記周期的歩容の間に過渡的な歩容が挿入されることを特徴とする請求の範囲の1項または2項記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。
4. 前記周期的歩容が静止歩容を含むことを特徴とする請求の範囲の3項記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。
5. 少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、
- a. 前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力である脚部反力を前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部反力算出手段、
- b. 少なくとも前記算出された脚部反力と目標床反力とから、少なくとも前記上体の動学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段、
- c. 少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位を算出する倒立振子モデル変位算出手段、
- d. 少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段、
- および
- e. 少なくとも前記算出された上体位置を用いて歩容を生成する歩容生成手段、

を備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。

6. 少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、

- a. 前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力に疑似的に対応する前記脚部のZMPに相当する脚部ZMPを前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部ZMP算出手段、
 - b. 少なくとも前記算出された脚部ZMPと目標ZMPとから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置を算出する倒立振子モデル支点位置算出手段、
 - c. 少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位を算出する倒立振子モデル変位算出手段、
 - d. 少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段、
- および

e. 少なくとも前記算出された上体位置を用いて歩容を生成する歩容生成手段、

を備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。

7. 前記倒立振子モデル支点位置算出手段は、前記目標ZMPに第1の係数を乗じて得た積から、前記脚部ZMPに第2の係数を乗じて得た積を減算して前記倒立振子モデルの支点位置を算出することを特徴とする請求の範囲の6項記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

8. 少なくとも上体と、前記上体に連結される複数本の脚部を備えた脚式移動ロボットの歩容生成装置において、

- a. 前記脚部の運動によって発生する慣性力と重力の合力である脚部反力を前記上体の挙動に依存せずに算出する脚部反力算出手段と、少なくとも前記算出された脚部反力と目標床反力とから、少なくとも前記上体の動力学的挙動を記述する倒立振子モデルの支点位置を算出する倒立振子モデル支点位置算出

手段と、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの支点位置に基づいて前記倒立振子モデルの変位を算出する倒立振子モデル変位算出手段と、少なくとも前記算出された倒立振子モデルの変位に基づいて前記上体の位置を算出する上体位置算出手段とから構成される動力学モデル、

- b. 少なくとも要求に応じ、前記脚部の軌道と前記床反力の軌道を決定するパラメータを少なくとも含む、今回歩容のパラメータを仮決定する今回歩容パラメータ仮決定手段、
 - c. 少なくとも前記要求に応じ、前記今回歩容に続く周期的歩容の前記パラメータを想定する周期的歩容パラメータ想定手段、
 - d. 前記周期的歩容の前記パラメータに基づき、前記周期的歩容の境界における前記倒立振子モデルの発散成分である周期的歩容境界発散成分を決定する周期的歩容境界発散成分決定手段、
 - e. 前記今回歩容のパラメータに基づき、前記動力学モデルを用いて生成される今回歩容の終端における前記倒立振子モデルの発散成分が前記周期的歩容境界発散成分に一致または実質的に一致するように、前記今回歩容のパラメータを修正する今回歩容パラメータ修正手段、
- および
- f. 少なくとも前記修正された今回歩容のパラメータに基づいて前記今回歩容の瞬時値を決定する今回歩容瞬時値決定手段、

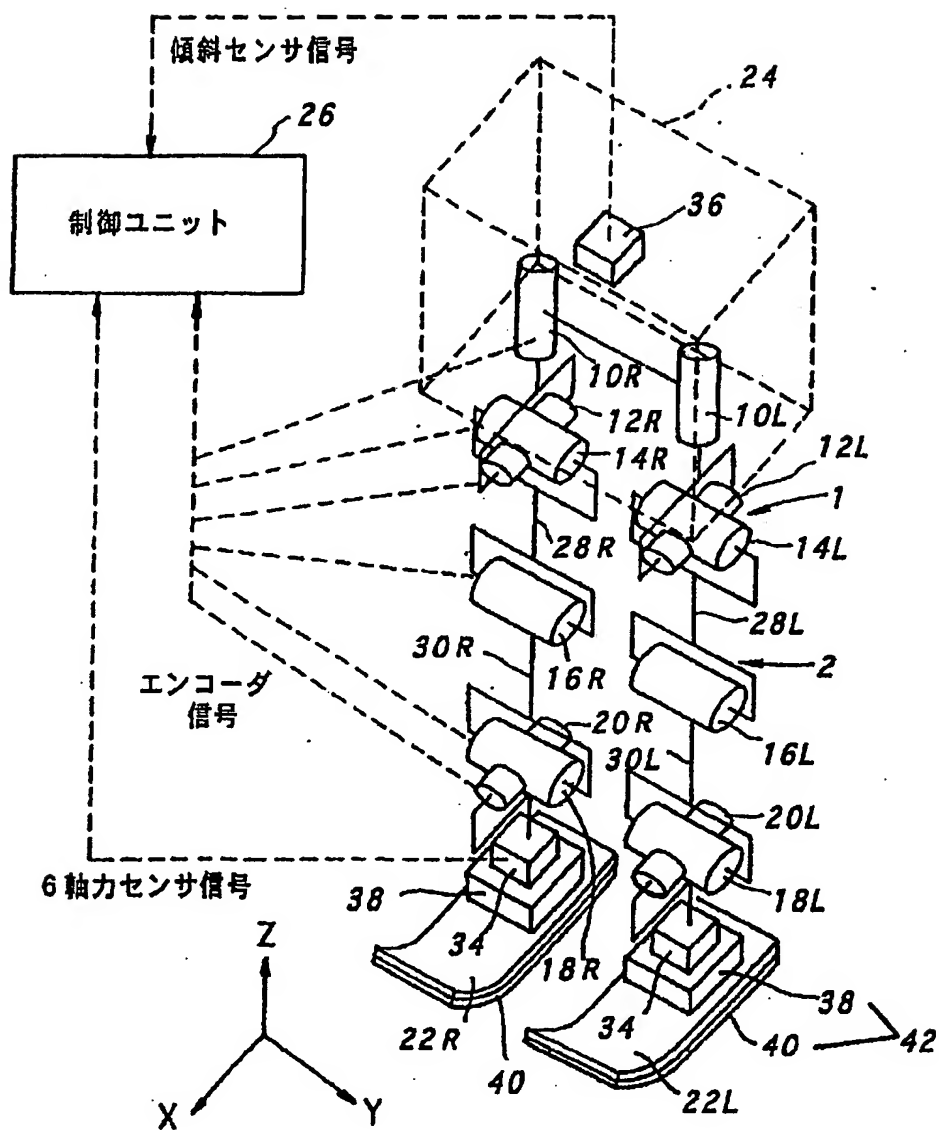
を備えたことを特徴とする脚式移動ロボットの歩容生成装置。

9. 前記床反力が少なくともZMPを含むことを特徴とする請求の範囲の1項から5項および8項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

10. 前記倒立振子モデルが線形モデルであることを特徴とする請求の範囲の1項から9項のいずれかに記載の脚式移動ロボットの歩容生成装置。

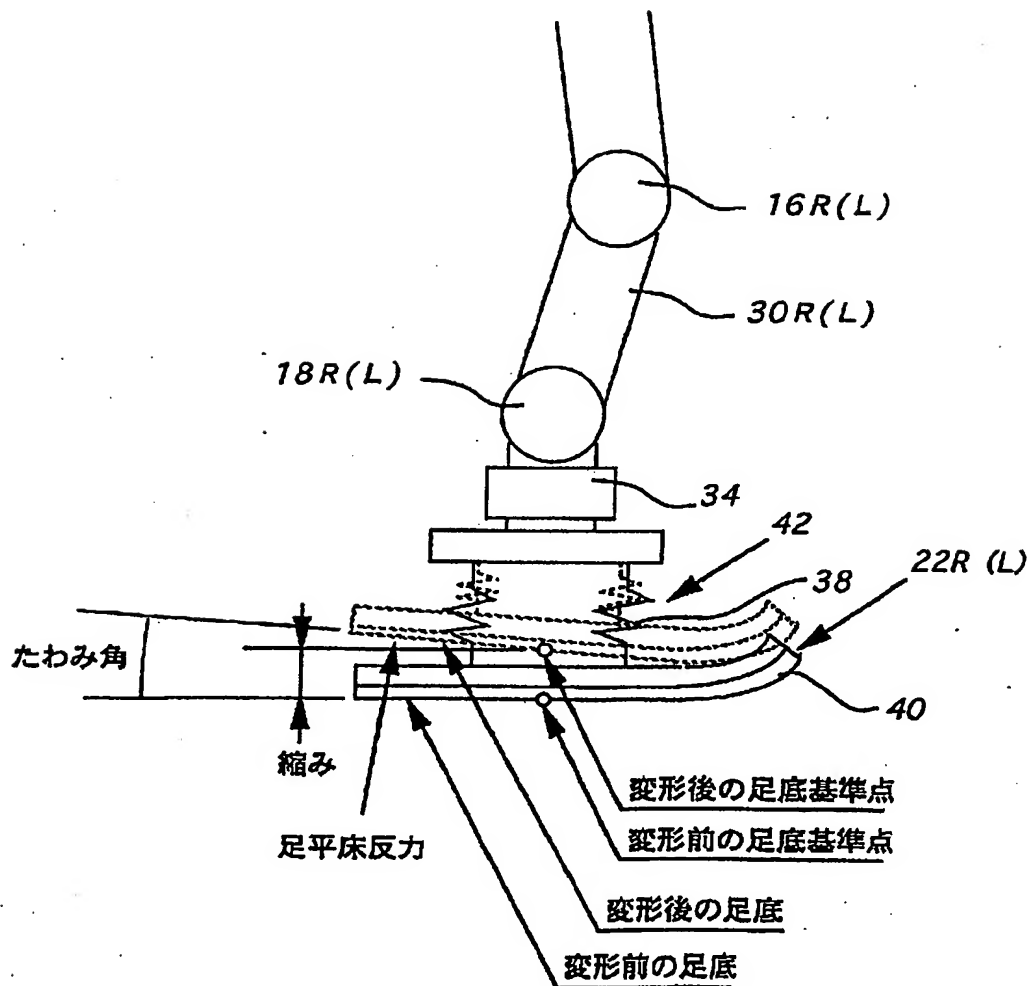
1/21

第1図



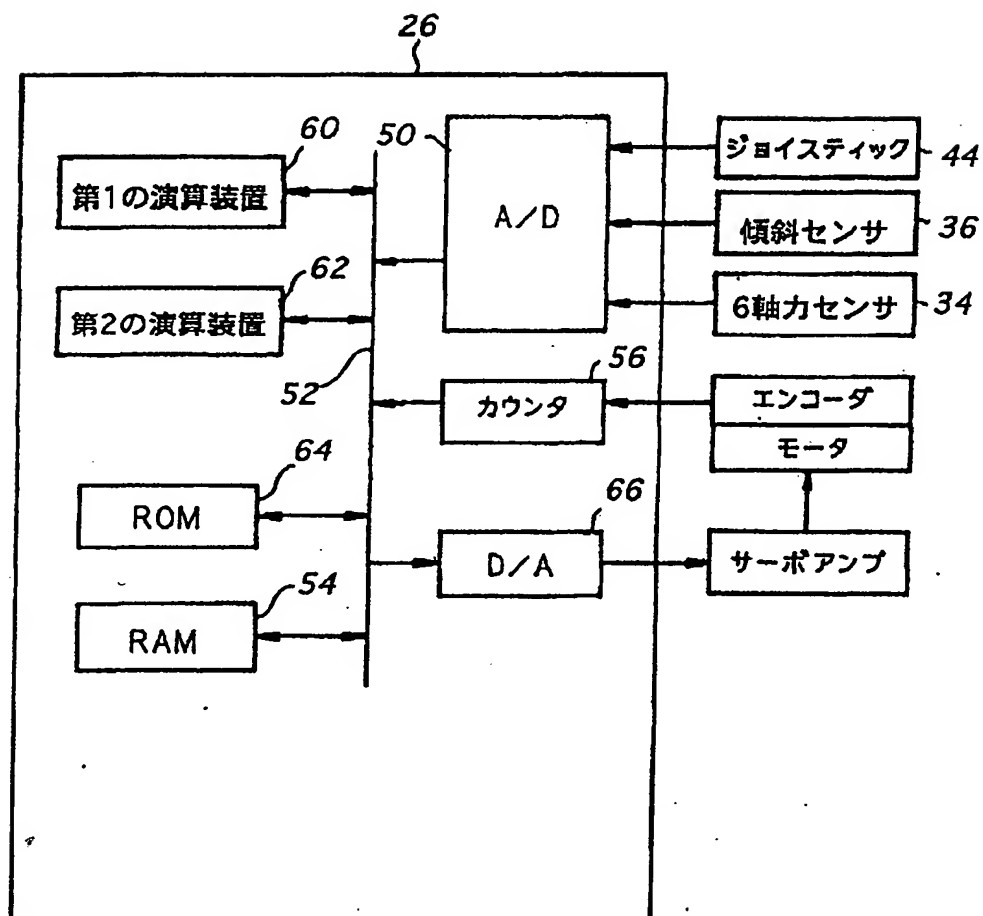
2/21

第 2 図

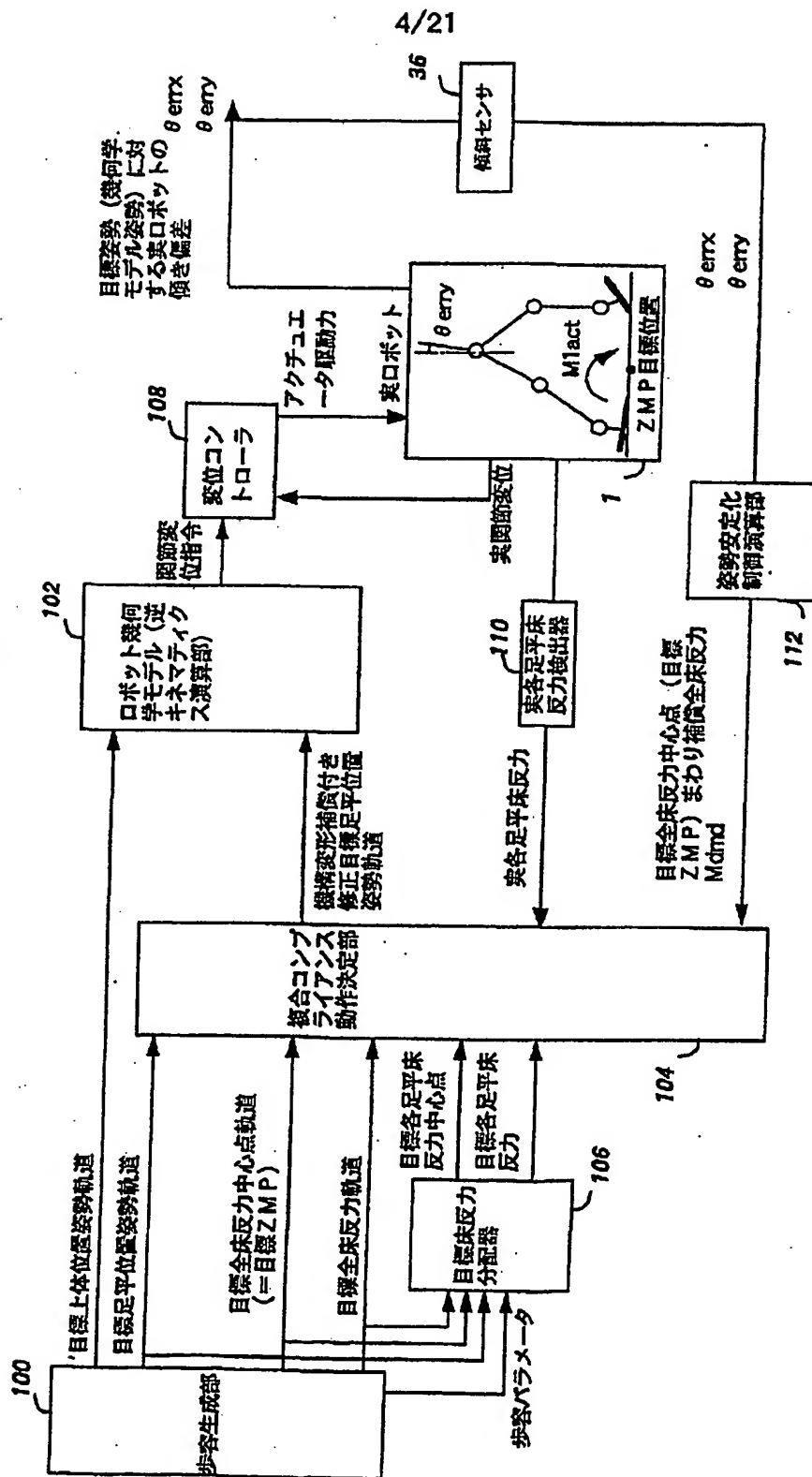


3/21

第3図

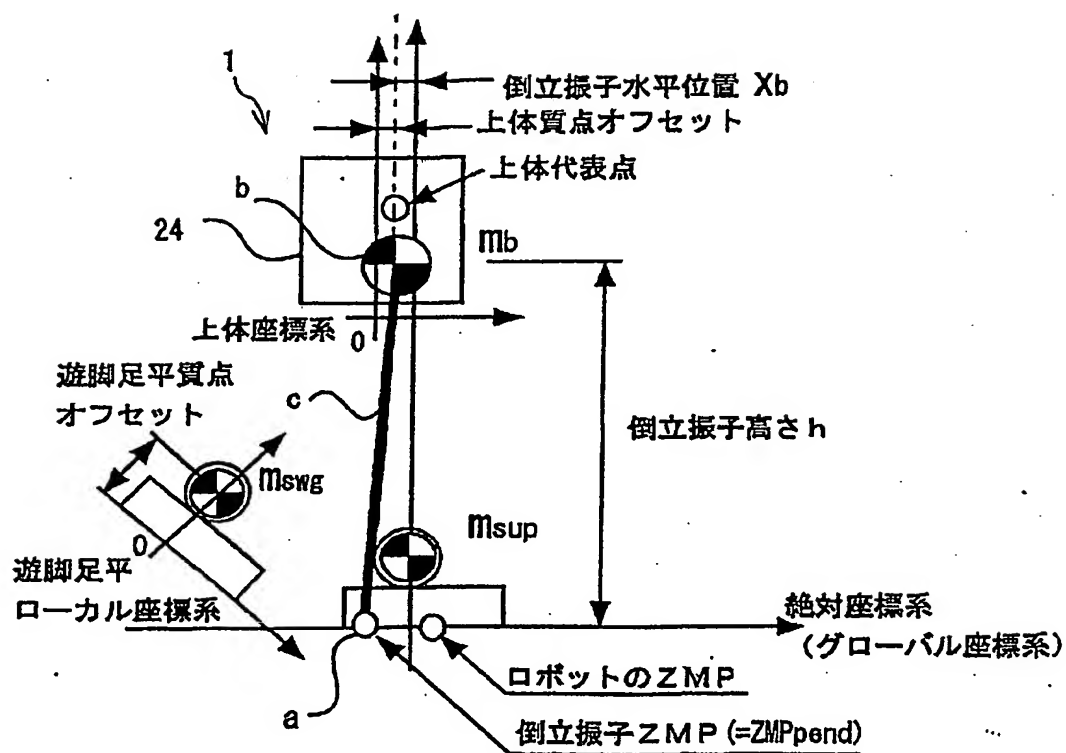


第4図



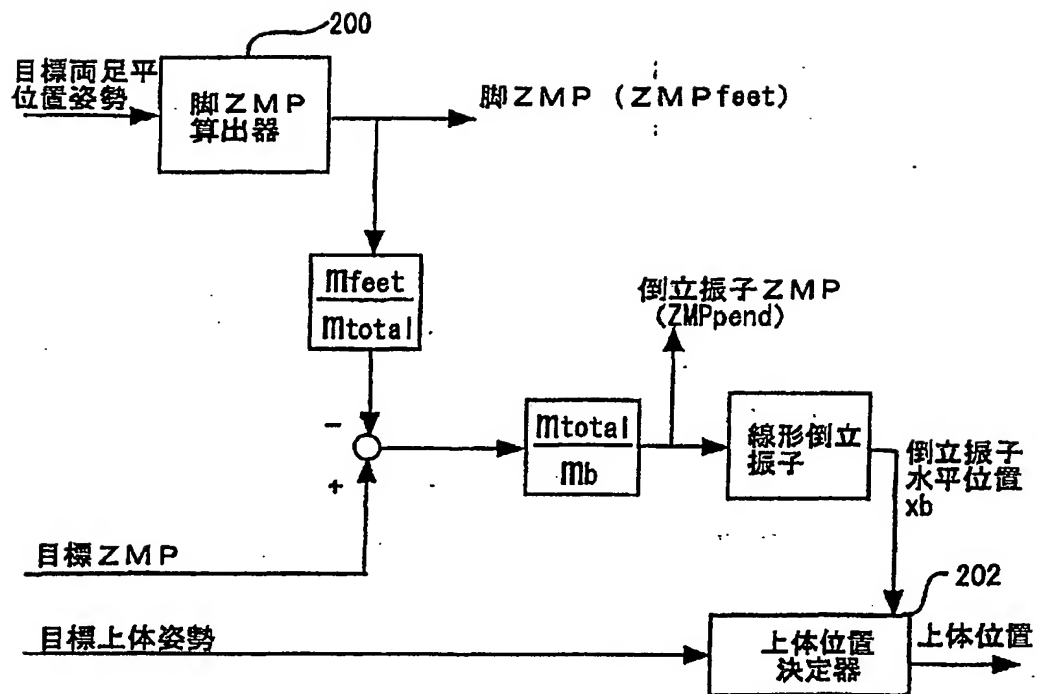
5/21

第5図



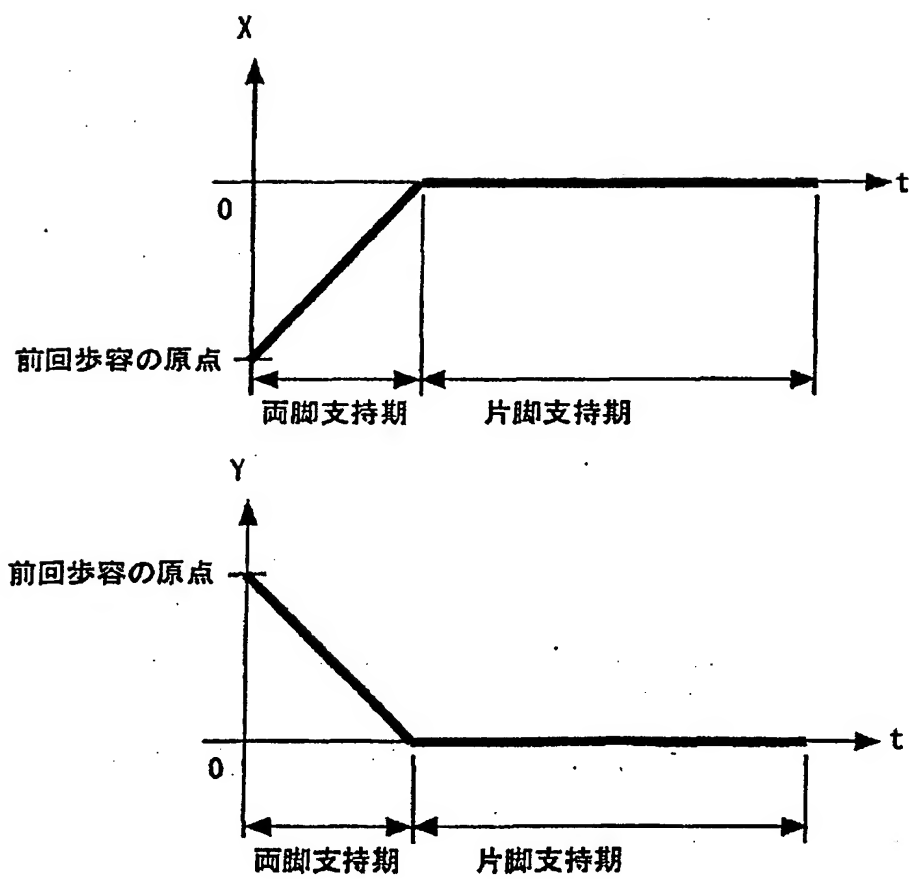
6/21

第6図



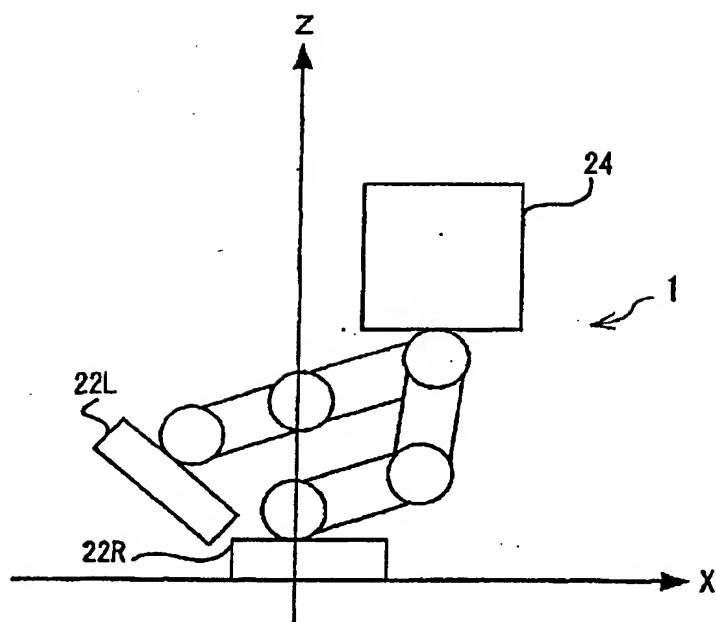
7/21

第7図



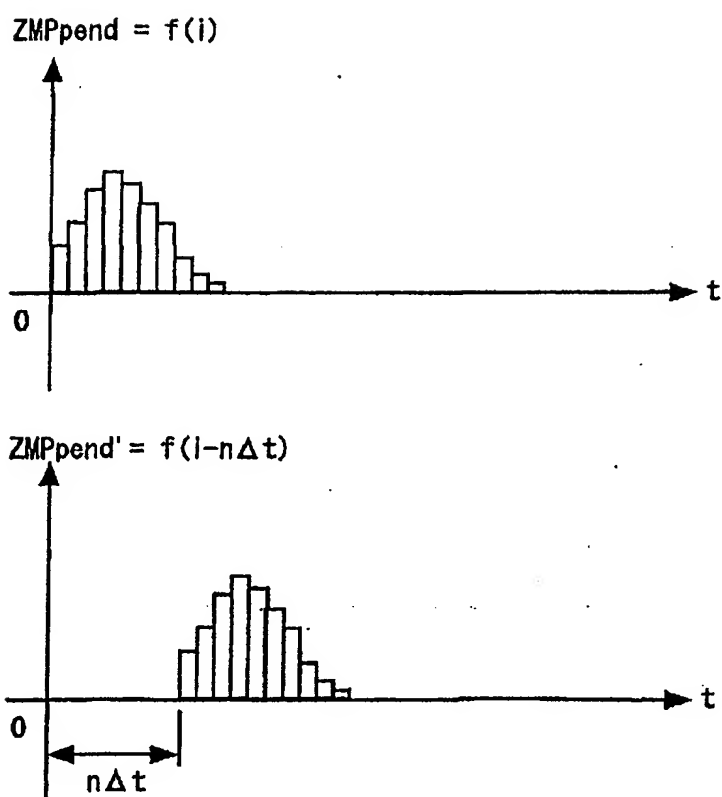
8/21

第 8 図



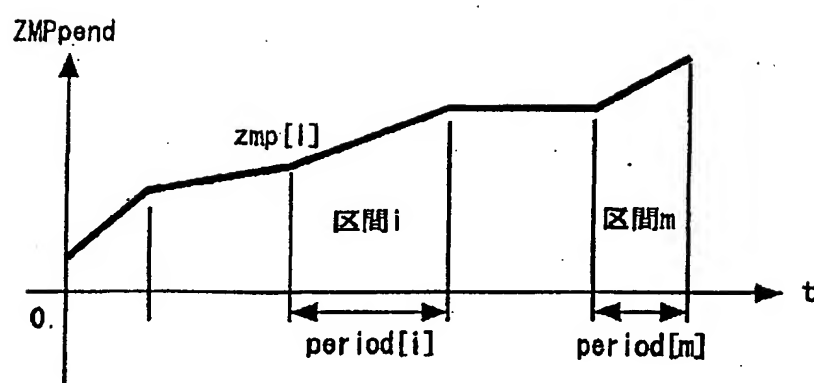
9/21

第 9 図



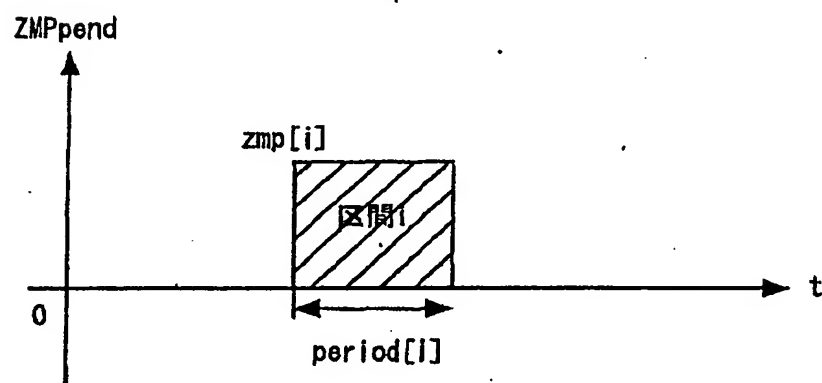
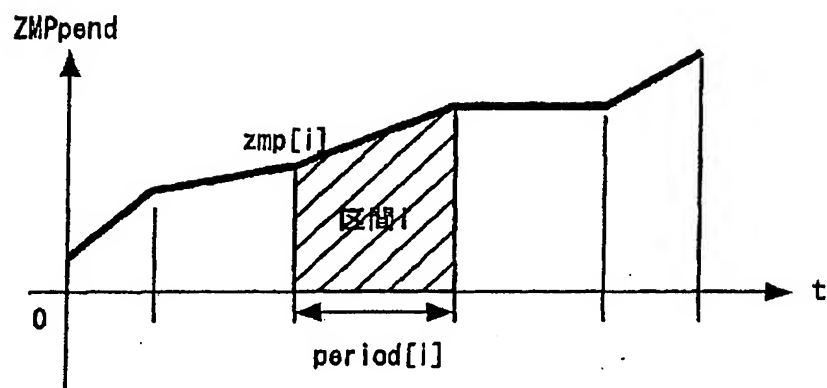
10/21

第10図

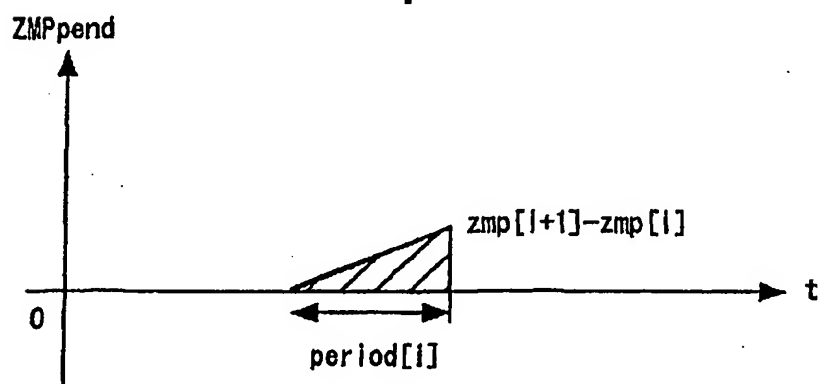


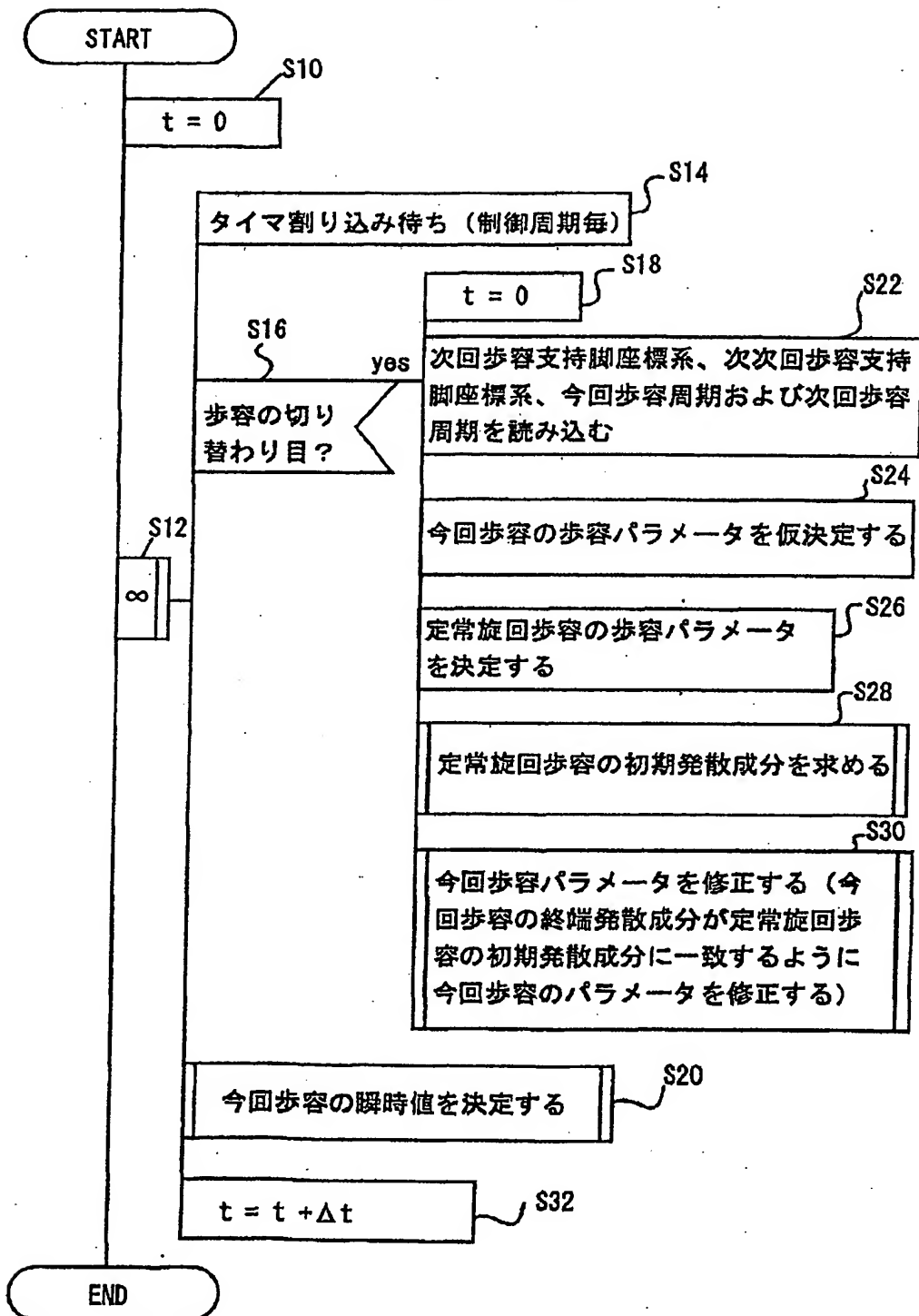
11/21

第 1 1 図



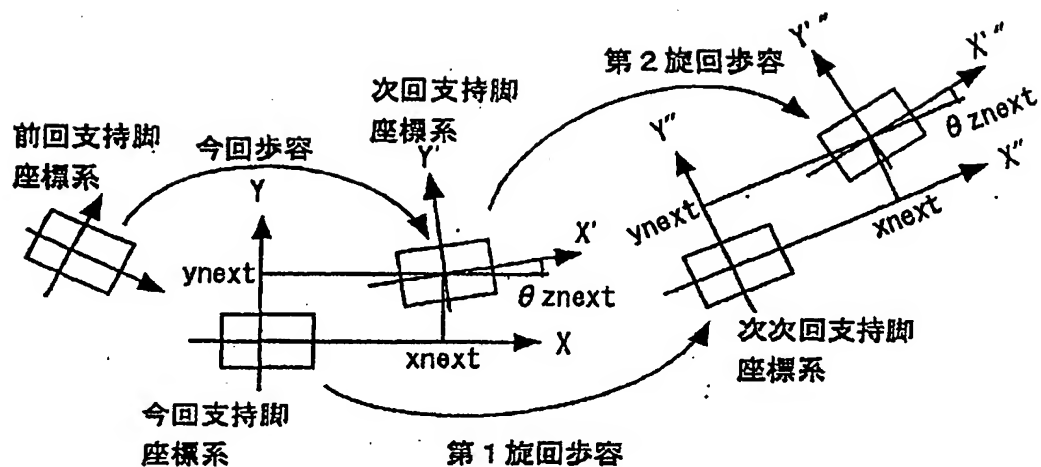
+



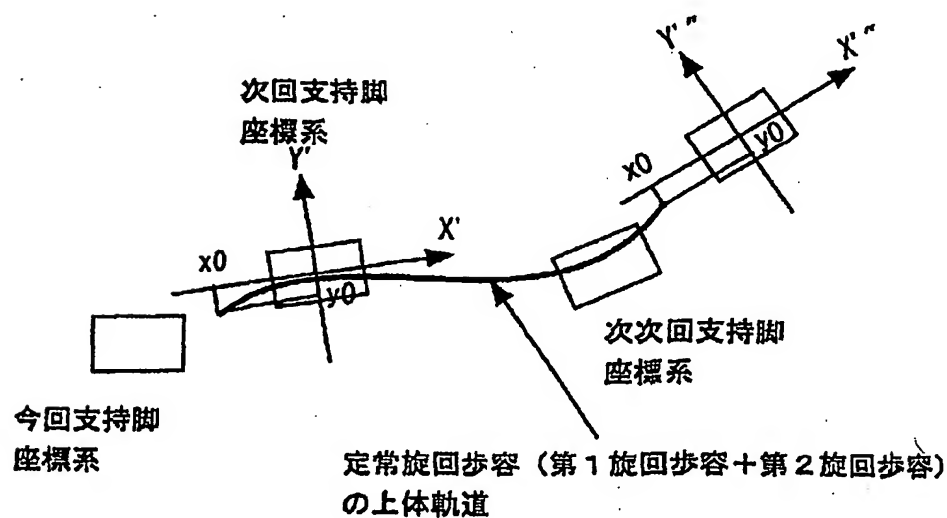
12/21
第 1 2 図

13/21

第 1 3 図

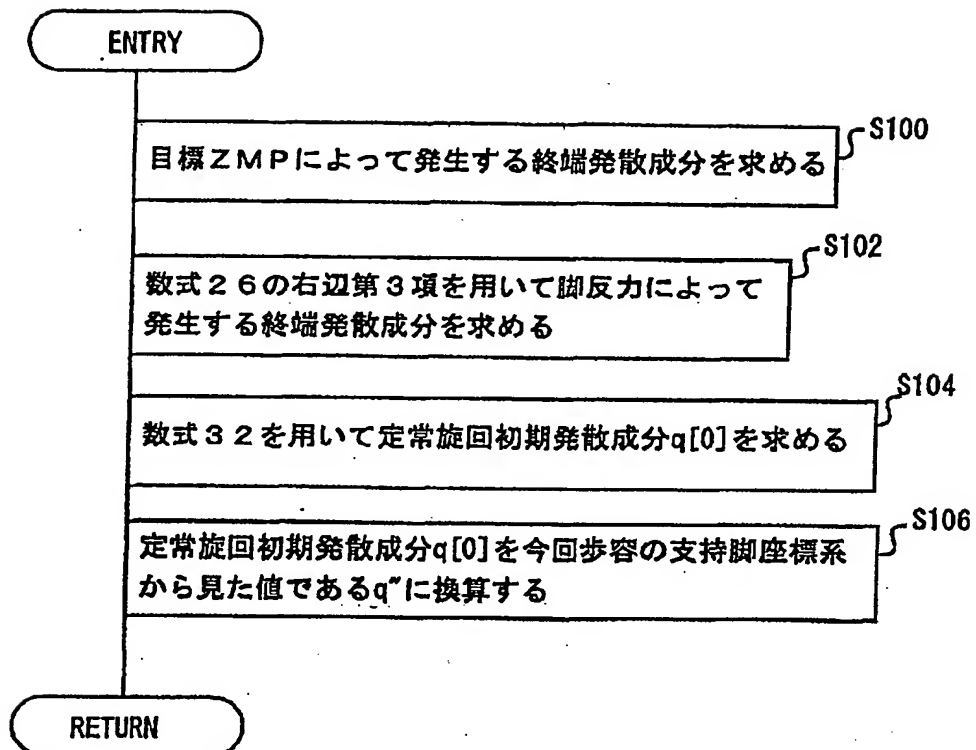


第 1 4 図



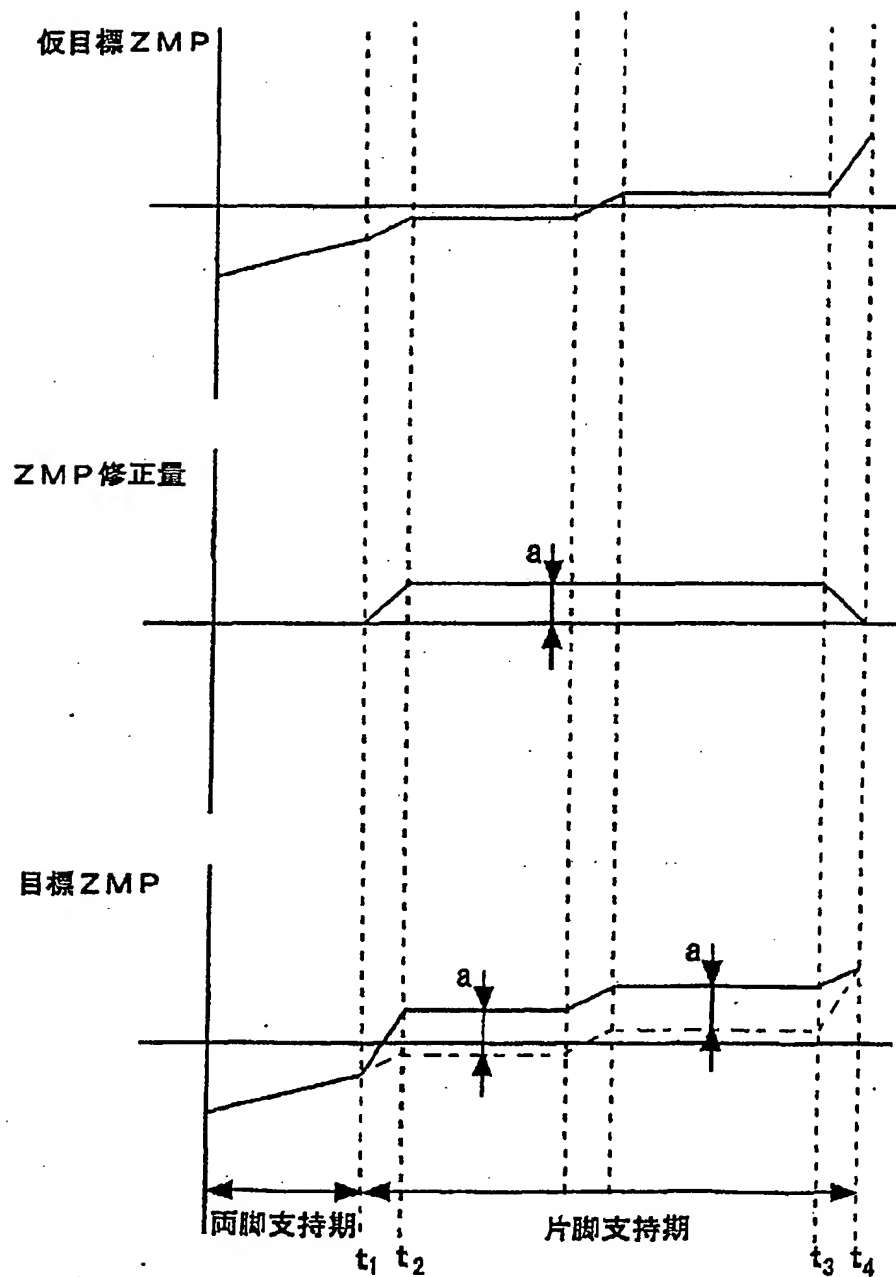
14/21

第 1 5 図



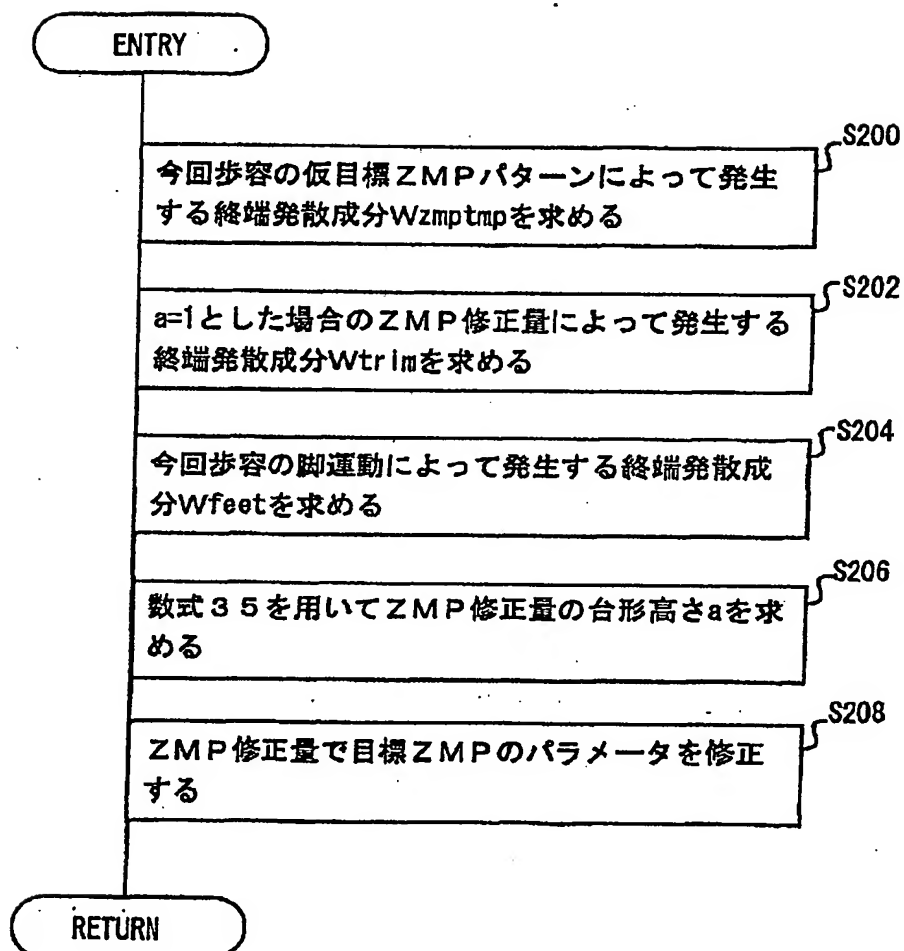
15/21

第 16 図



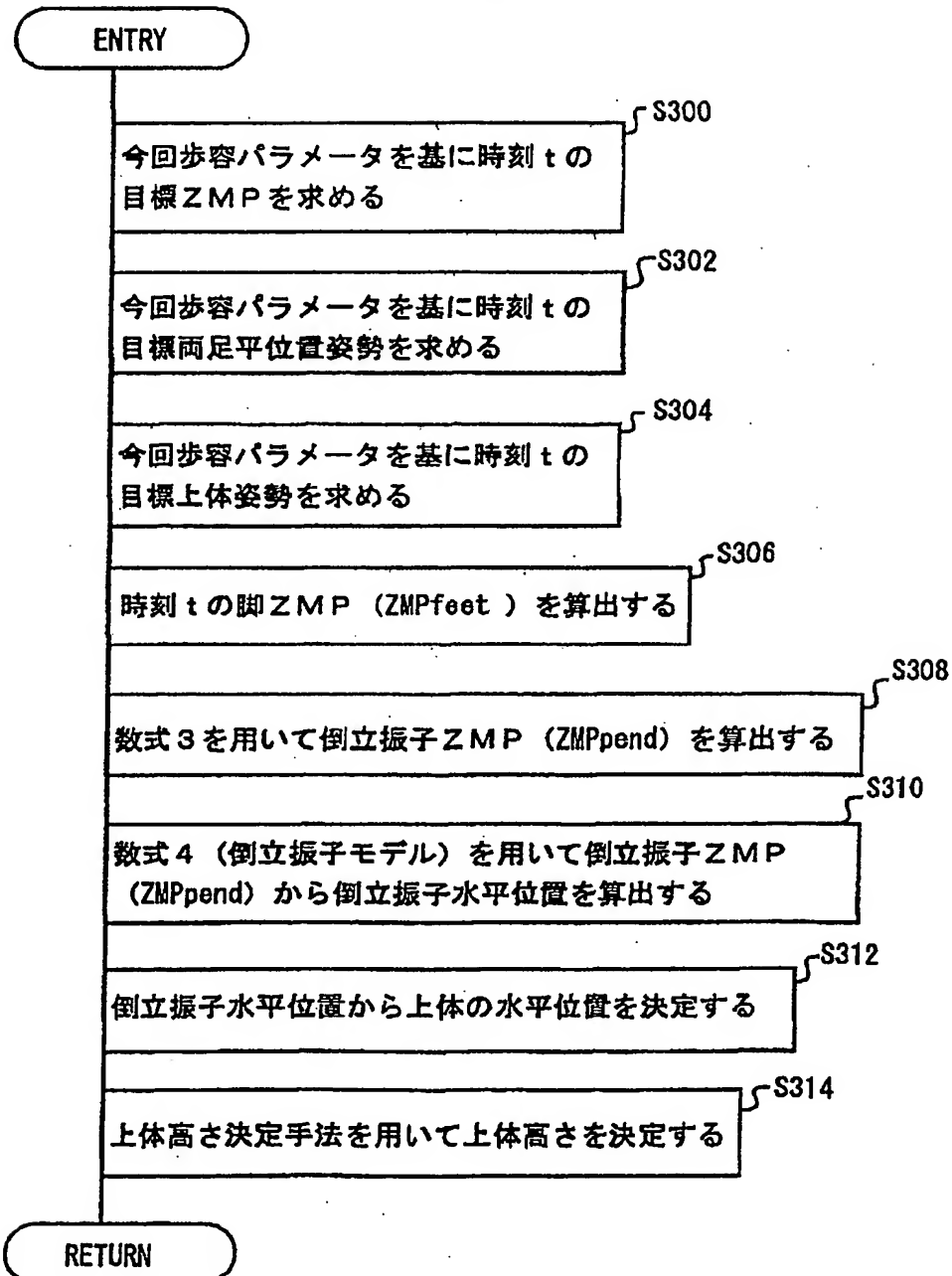
16/21

第 17 図



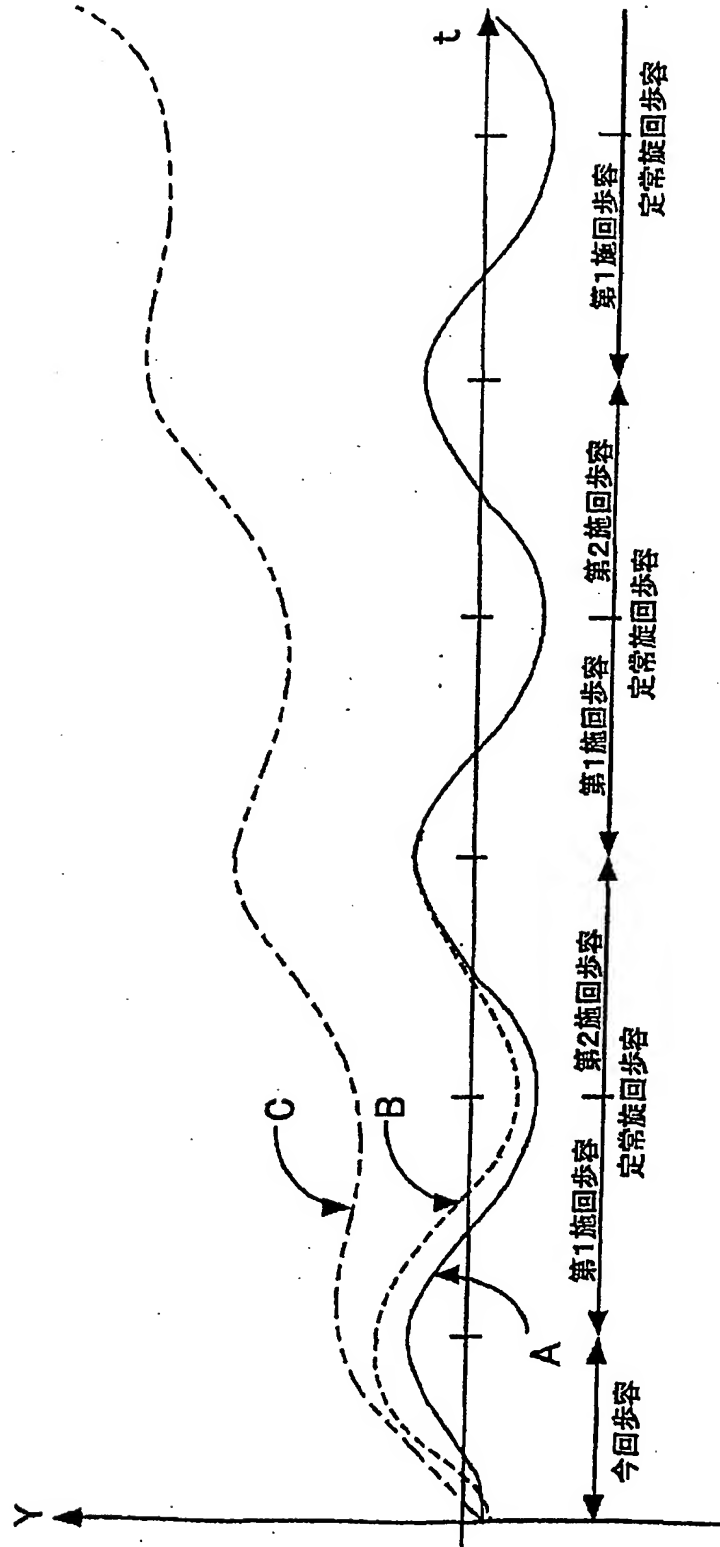
17/21

第 18 図



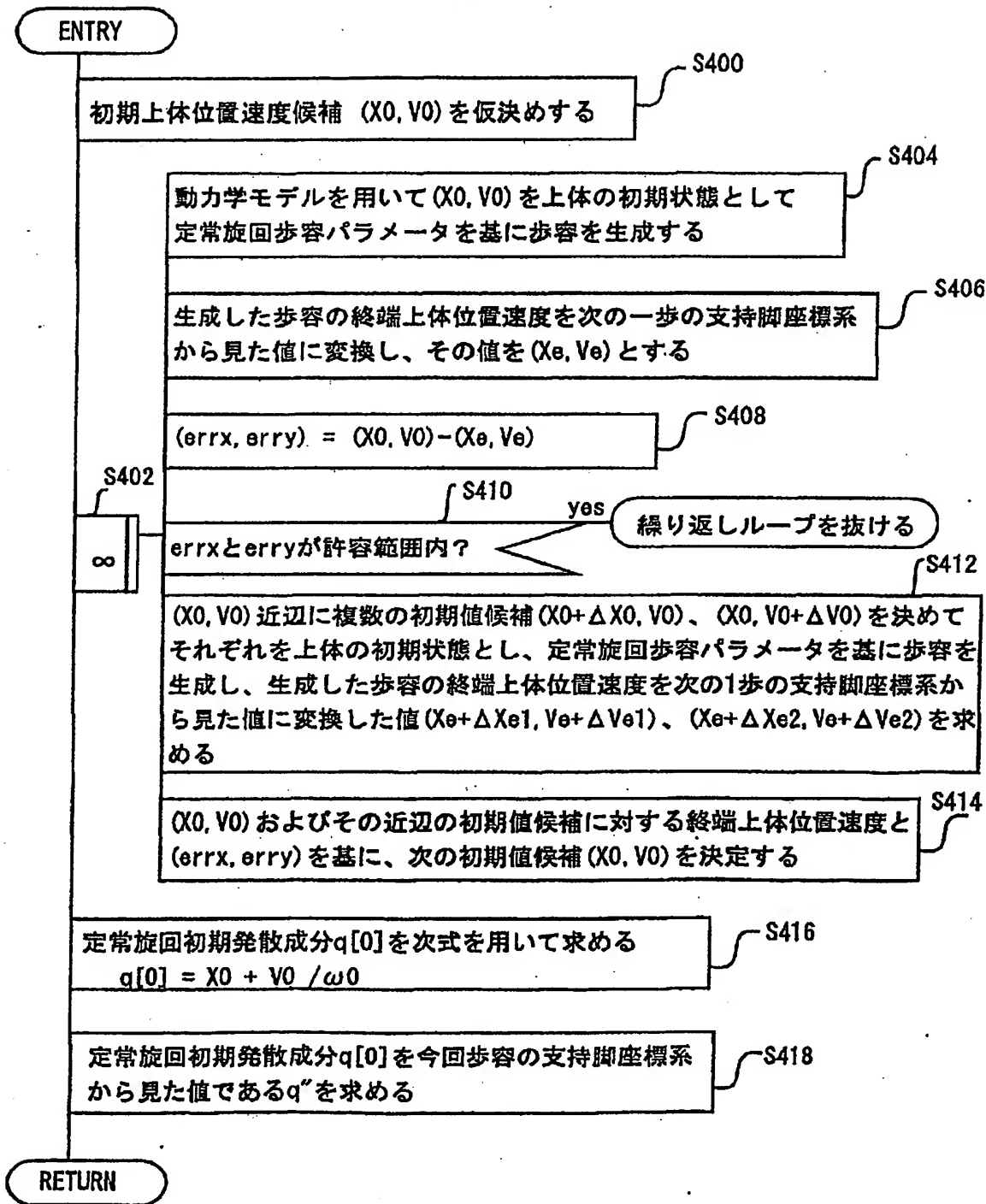
18/21

第19図



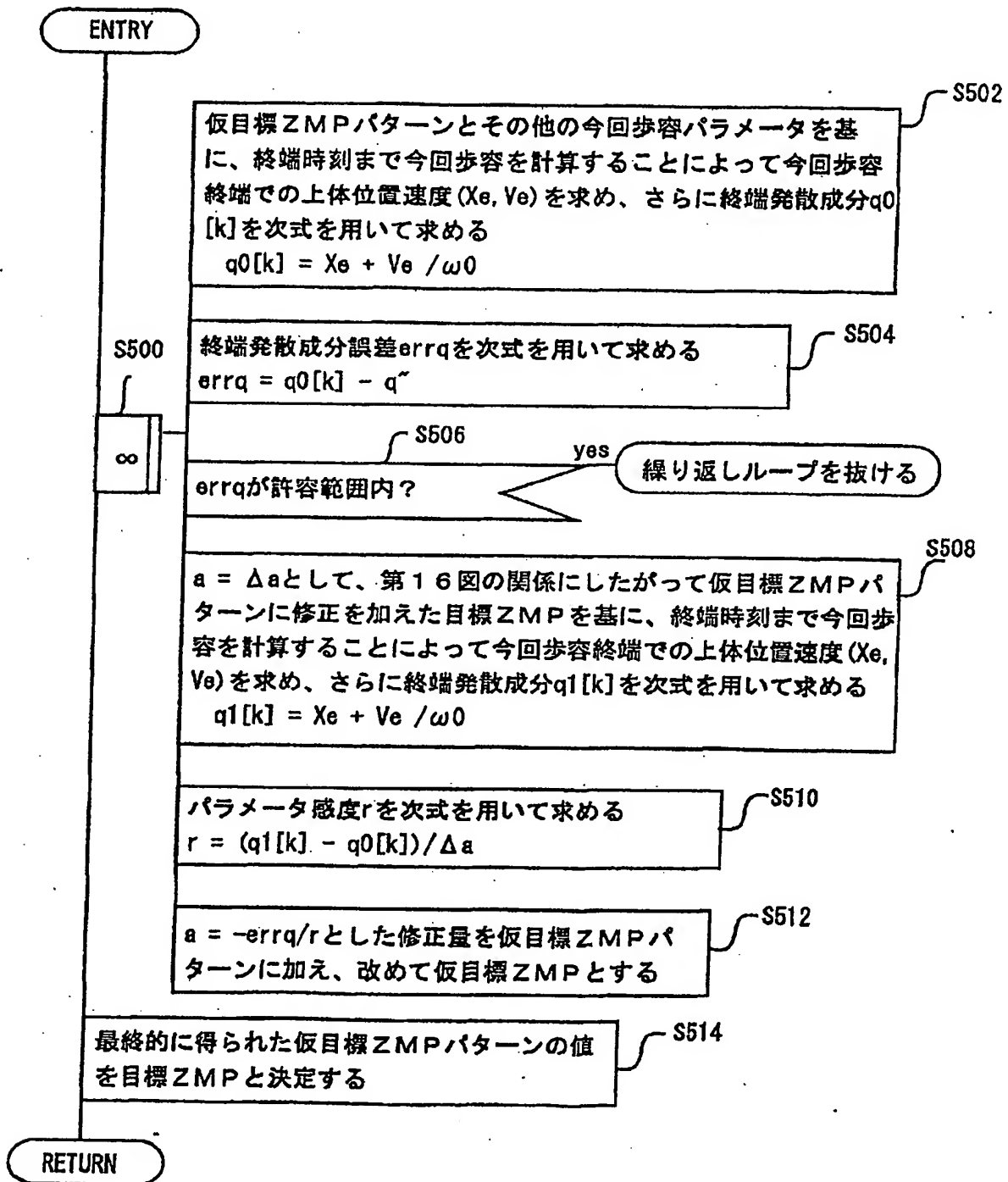
19/21

第20図



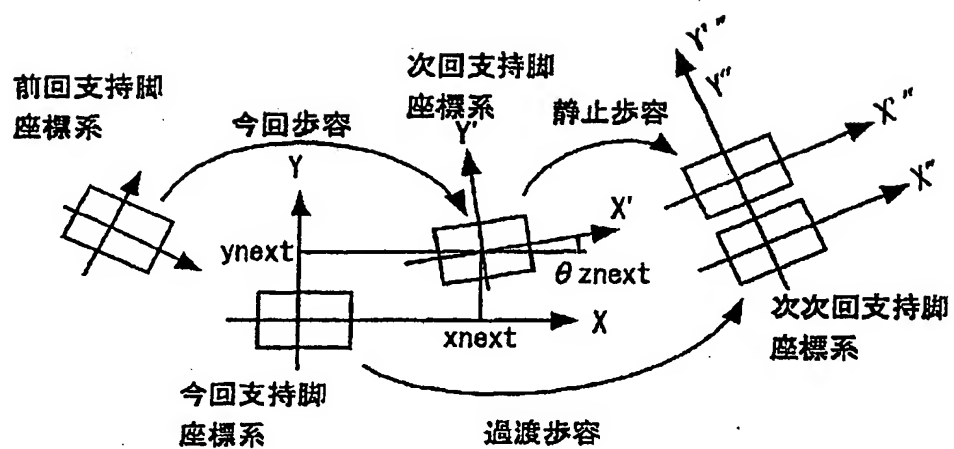
20/21

第 2 1 図

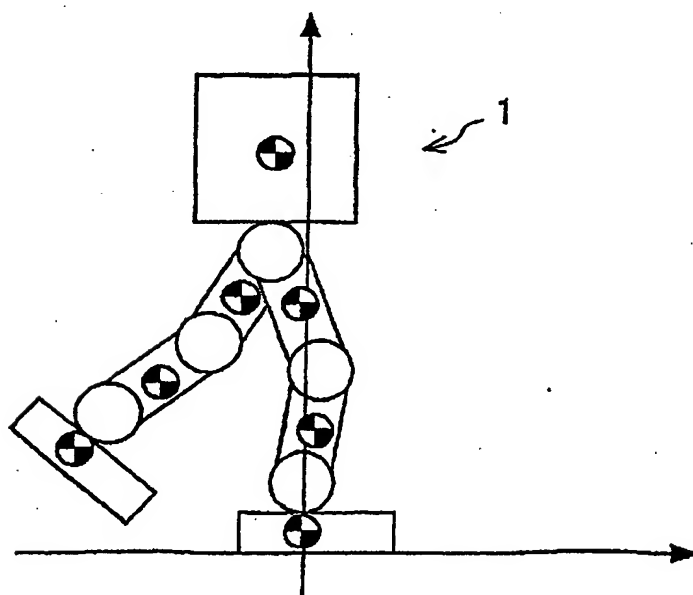


21/21

第 2 2 図



第 2 3 図



**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning
Operations and is not part of the Official Record**

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☐ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.